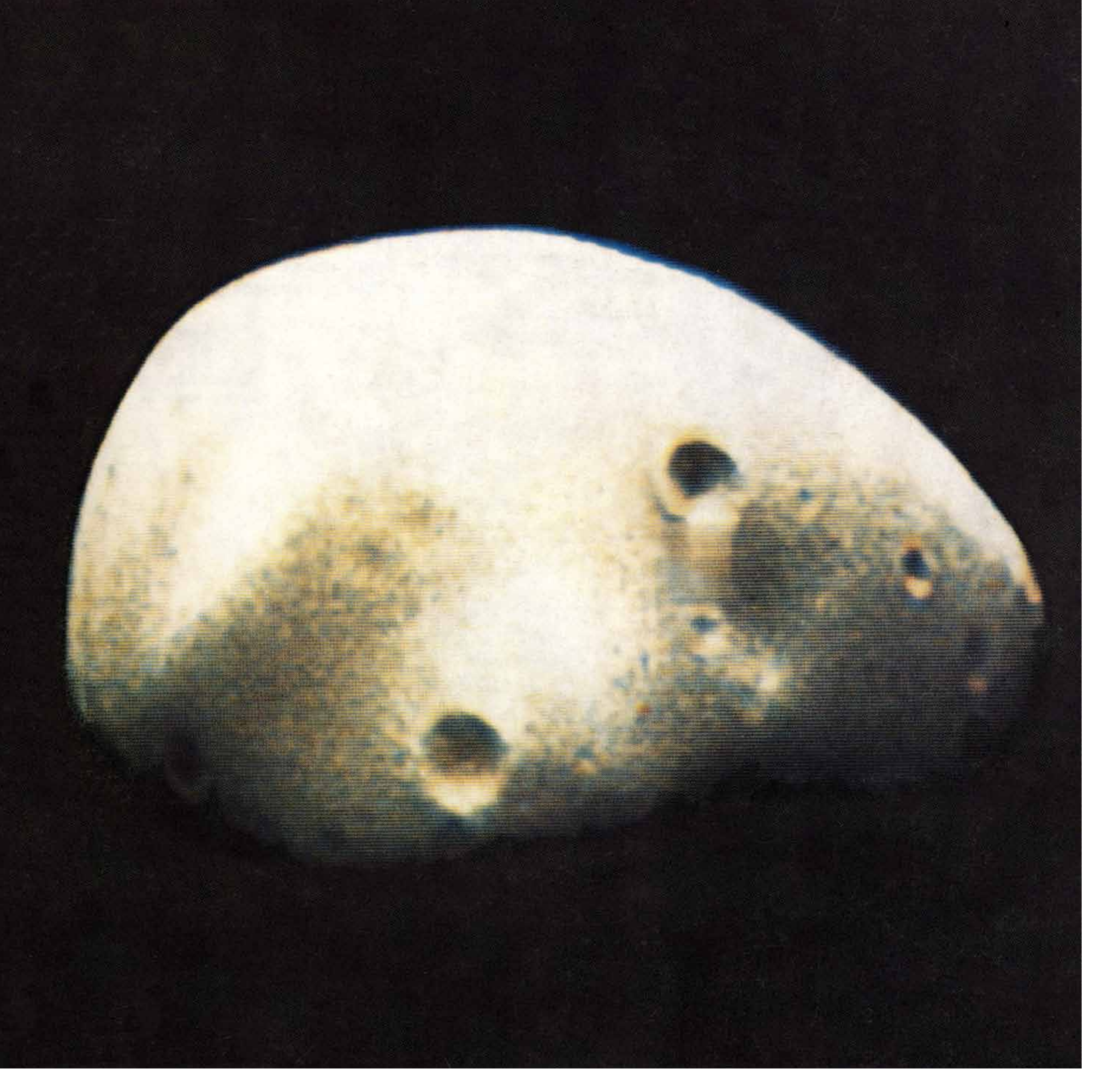
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



LAS LUNAS DE MARTE

Abril 1977

140 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 7
Abril 1977

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA: Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15
ESPAÑA

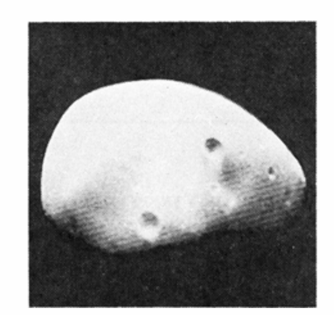
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Miguel Téllez González: *Misiles crucero;* Ramón Canal: *Fobos y Deimos;* Antonio Castillo: *Comunicaciones intercontinentales por satélite;* Francisco Navarro: *El origen de la aterosclerosis;* Amando García Rodríguez: *La separación de isótopos con láser;* Gerardo Espinosa: *Lenguaje social y no social;* Monique Robert: *La respuesta a la acetilcolina;* Andrés Muñoz Machado: *Taller y laboratorio;* Luis Bou García: *Juegos matemáticos.*

Libros:

Angel Rivière



LA PORTADA

La fotografía de la portada es una imagen en color de Deimos producida mediante computador. Deimos es la más pequeña de las dos lunas de Marte (véase el artículo "Fobos y Deimos" en este mismo número.) Un par de imágenes de Deimos obtenidas por el *Viking* 1, una a la longitud de onda de la luz violeta y otra a la longitud de onda de la luz naranja, se combinaron en una sola imagen para buscar las diferencias de color en la superficie lunar. La imagen aparece aquí orientada de manera que la iluminación está proyectada de arriba abajo. Esto impide que los relieves destacados de la superficie se inviertan, de suerte que depresiones tales como los cráteres parecen elevaciones. Esta imagen de prueba mostró que, al menos con una resolución lo suficientemente fina como para registrar cualquier objeto de 200 metros o más de diámetro, la superficie de Deimos es de un color gris uniforme; los leves trazos de color naranja en algunos cráteres se deben a la técnica de la imagen.

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 1.540 pesetas
Seis meses (6 números): 800 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números); 30 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
160 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
225 pesetas.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada por cortesía de Jet Propulsion Laboratory.

Página	Fuente
6-18	Manuel Losada
21	Andrew Christie
22-24	U.S. Navy
25	U.S. Air Force
26-29	Andrew Christie
33-34	Jet Propulsion Laboratory
35	Lorelle M. Raboni
36	Jet Prop. Laboratory *(arriba)* Lorelle M. Raboni *(abajo)*
37-38	Lorelle M. Raboni
39	Jet Propulsion Laboratory
45	Hughes Aircraft Company
46-48	Dan Todd
49	Com. Satel. Corporation
50-55	Dan Todd
57	Earl P. Benditt
58	Carol Donner

Página	Fuente
59-60	Earl P. Benditt *(izquierda)* Carol Donner *(derecha)*
62-63	Carol Donner
64-66	Jerome Kuhl
69	Fritz Goro
70-78	Allen Beechel
82-83	Laszlo Kubinyi
84	Laszlo Kubinyi *(arriba)* Jerome Kuhl *(abajo)*
85	Jerome Kuhl
86	Laszlo Kubinyi *(arriba)* Jerome Kuhl *(abajo)*
87	Jerome Kuhl
88-89	John E. Heuser
90-93	Bunji Tagawa
94	Michael W. Klymdowsky, Michael J. Ross, Robert M. Stroud y Michael A. Raftery *(izquierda)*; Bunji Tagawa *(derecha)*
95-98	Bunji Tagawa
102-109	Ilil Arbel

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Fort, S.A.
Rosellón, 33 - Barcelona-15
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda.
Barcelona.

Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

Señor Director:

En su artículo "La mecánica cuántica de los agujeros negros" (*Investigación y Ciencia*, marzo, 1977), S.W. Hawking menciona por dos veces la famosa frase de Einstein "Dios no juega a los dados con el mundo". Quizá resulte interesante recoger qué es lo que dijo exactamente Einstein.

Ronald W. Clark, en su obra *Einstein: The Life and Times*, cita dos cartas de Einstein en que menciona el tema. La primera, dirigida a Max Born en 1926, dice:

"La mecánica cuántica es sin duda imponente. Pero una voz interior me dice que no es aún la cosa auténtica. La teoría dice mucho, pero en nada nos acerca al secreto del Viejo, En cualquier caso, yo estoy convencido de que El no echa los dados".

La segunda carta, muy posterior, iba remitida a James Franck: "Si llegase a pasar lo peor, puedo percatarme aún de que el Buen Dios quizá haya creado un mundo en el cual no hayan leyes naturales. En resumen, un caos. Pero que debería haber leyes estadísticas con soluciones definidas, es decir, leyes qué obliguen al Buen Dios a echar los dados en cada caso en particular, lo encuentro altamente discordante".

ARTHUR J. MORGAN

Nueva York

Señor Director:

El artículo de Jean Mayer sobre las dimensiones del hambre humana (*Investigación y Ciencia*, noviembre, 1976) es valioso y esclarecedor, pero contiene errores de hecho y de interpretación respecto de la pesca como fuente de proteínas. Durante el bienio 1970-71, el volumen mundial de pesca se mantuvo estable, siendo del orden de los 70 millones de toneladas, pero descendió en 1972 a unos 66 millones de toneladas: por tanto, no puede decirse que "se situó por debajo de los 55 millones de toneladas".

Bajón que no fue debido "a la intensidad de una pesca indiscriminada y a la contaminación", sino a condiciones oceanográficas específicas de la costa noroccidental de América del Sur (El Niño), unidas a la pesca excesiva de una sola especie, la anchoveta peruana. En particular, la captura de esta última superó los 13 millones de toneladas, lo que representó casi el 20 por ciento de la captura mundial total y más del 20 por ciento de la captura marina. Hacia 1972, había descendido a menos de 5 millones de toneladas, casi el 7 por ciento de la captura total de ese año. La captura de la anchoveta peruana llegó a su nadir con 2 millones de toneladas en 1973, y ha registrado una ascendente mejoría al amparo de estrictas medidas administrativas.

Las capturas mundiales, contando a las de agua dulce, han ido aumentando a razón de un poco más del 5 por ciento anual desde 1955. En 1974, último año del que se dispone de estadísticas completas, fueron del orden de unos 70 millones de toneladas, nivel comparable al del bienio 1970-71. Las capturas marinas han crecido a razón de poco menos del 5 por ciento anual desde 1955, y en 1974 rondaban los 61 millones de toneladas.

En la Conferencia Mundial sobre Alimentación, de las Naciones Unidas, celebrada a finales de 1974, se señaló que "el rendimiento potencial anual de las especies marinas clásicas de peces, crustáceos y moluscos se considera de 118 millones de toneladas, y otras estimaciones ulteriores han confirmado tal cálculo superior a los 100 millones de toneladas". La proyección de la tendencia de 1955-74, para los peces marinos, muestra que, hacia 1985, alcanzará el nivel de los 118 millones de toneladas, pero hay cuatro factores, por lo menos, que permiten más optimismo cara al futuro:

1. La proyección se refiere a especies clásicas o aceptables hoy en día. La proyección para especies no convencionales en especial el *krill* antártico, empieza a partir de otros 100 millones de toneladas, y de ahí en adelante.

2. La producción de alimentos procedentes del mar podría aumentarse sin incrementar las capturas. Un modo de conseguirlo sería destinar las especies consumidas hasta ahora y convertidas de manera relativamente ineficaz en fuentes de proteína animal para pollos y otros animales a su uso directo como alimento humano.

3. Aunque existen graves problemas de orden tecnológico y económico que dificultan la predicción del futuro de la acuacultura, no puede descartarse la posibilidad de incrementos significativos dentro de 10 o 20 años.

4. La ola actual de aceptación de una ampliación de los límites jurisdiccionales de las aguas territoriales implica que las especies sometidas a una captura intensa, por pertenecer a todos y por tanto a nadie, puedan tal vez regresar a su índice anterior de productividad en los próximos 10 o 20 años.

ROBERT W. SCHONING

Director del
National Marine & Fisheries Service
Washington.

ERRATA

Número 6, marzo de 1977

Pág.	*columna*	*línea*	*dice*	*debe decir*
8	1	20-21	*(véase la ilustración de la página 9)*	*(véase la ilustración de la página 8)*
12	2	1	Es sólo del 5 por	Es sólo del 0,5 por
12	3	34-35	con las nuevas facilidades	con las nuevas instalaciones
112	1	31	fracciones de milímetro	fracciones de pulgada

Los autores

MANUEL LOSADA VILLASANTE ("Los distintos tipos de fotosíntesis y su regulación") es catedrático y jefe del Departamento de Bioquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Sevilla y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Anteriormente trabajó como investigador durante seis años en Alemania, Dinamarca y Estados Unidos. Sus campos de investigación son, principalmente, la fotosíntesis y el metabolismo del nitrógeno inorgánico, habiendo publicado más de un centenar de artículos y revisiones sobre estos temas. El profesor Losada es consejero del CSIC y académico de la Real Academia de Ciencias.

KOSTA TSIPIS ("Misiles crucero") es físico del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Dedica todo su tiempo a los problemas de la defensa civil y del control de armamentos. Nacido en Grecia, llegó a los Estados Unidos en 1954. Después de graduarse en ingeniería eléctrica (BS) y física atómica (MS) en Rutgers, pasó a la Universidad de Columbia en donde, en 1966, obtuvo el doctorado en física de partículas de alta energía. Ese mismo año entró en el claustro del M.I.T. Escribe: "Se me ha suscitado un interés cada día mayor por el problema de la ciencia aplicada a cuestiones públicas y, particularmente, al control de armamentos. Con el tiempo, advertí que el problema de la regulación de armamentos era demasiado serio e importante para tratarlo sólo a nivel de bufete; por ello dedico todo mi tiempo a investigar, dar conferencias y escribir sobre los aspectos técnicos de su limitación."

JOSEPH VEVERKA ("Fobos y Deimos") es profesor adjunto de astronomía de la Universidad de Cornell. Se licenció en física por la Queen's University, en Canadá. Tras acabar su doctorado en astronomía en la Universidad de Harvard, en 1976, entró en el Laboratory for Planetary Studies, de Cornell. Está especialmente interesado en la historia y evolución de los satélites de los planetas y en su exploración directa por vehículos espaciales. En 1971 y 1972 fue miembro del equipo de televisión del *Mariner* 9, que llevó a cabo el primer examen detallado de los satélites de Marte. Actualmente es miembro del equipo que dirige las expediciones de los *Viking*.

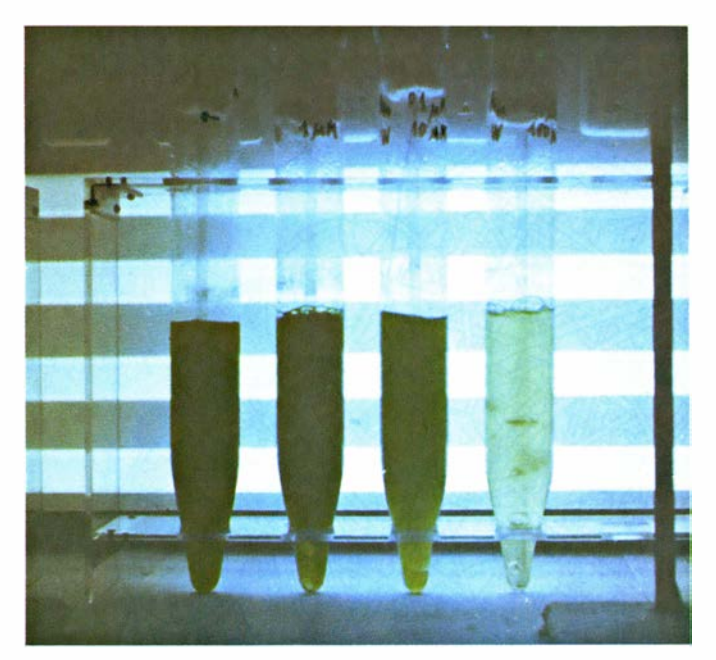
BURTON I. EDELSON ("Comunicaciones intercontinentales por satélite") dirige los Laboratorios de COMSAT (Communications Satellite Corporation) en Clarksburg. Se dedica a trabajos de investigación y proyecto de naves espaciales, sistemas de microondas, proceso y tecnología de transmisores. Se graduó en la U.S. Naval Academy en 1947 y se doctoró en la Universidad de Yale. Su interés por la tecnología del espacio surgió cuando ejercía su carrera de marino en el campo del desarrollo de equipos para la navegación y comunicación de barcos en alta mar vía satélite. Como encargado de los proyectos de la Marina pasó del desarrollo de equipos de a bordo al proyecto de satélites. En 1967 pidió la excedencia en la Armada e ingresó en el COMSAT, para trabajar en varias aplicaciones comerciales de la tecnología del espacio.

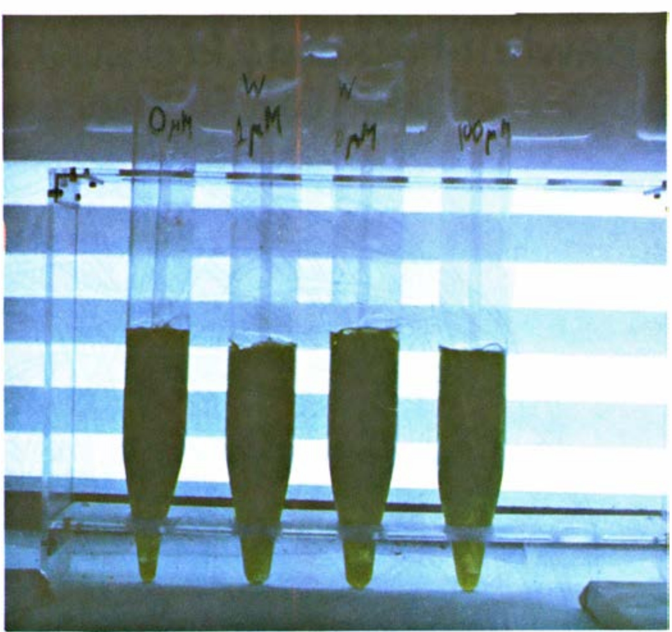
EARL P. BENDITT ("El origen de la aterosclerosis") es profesor y jefe del Departamento de Patología en la School of Medicine de la Universidad de Washington. Se doctoró en la Harvard Medical School en 1941. Trabajó como interno en el Hospital General de Filadelfia, para pasar luego a la clínica universitaria de Chicago, en donde permaneció desde 1944 hasta 1957, año en que se incorporó a la Universidad de Washington. Escribe: "Mis intereses científicos se centran en el estudio de las enfermedades y, especialmente, el de las enfermedades humanas. Durante muchos años, con mis estudiantes, nos hemos interesado en cómo las células y los tejidos responden a las heridas. Cuando empezamos no existían ni métodos ni ciertos conceptos biológicos fundamentales para estudiar las enfermedades humanas de la manera que yo quería y me parecía necesaria. En vista de ello experimentamos con animales destinados a ser modelos de las enfermedades de las personas. Ha sido para mí un placer observar, animar a otros y participar en progresos que nos han proporcionado el poder estudiar aspectos fundamentales de las enfermedades humanas. Estoy fascinado por la interacción de las personas con su medio ambiente y por el papel de éste en la inducción de enfermedades".

RICHARD N. ZARE ("La separación de isótopos con láser") es profesor de física de la Universidad de Columbia. Nacido en Cleveland en 1939, recibió su grado B.A. por la Universidad de Harvard en 1961 y su Ph.D. (en química física) en la misma institución, en 1964. Después de trabajar en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Universidad de Colorado, enseñó química en Columbia en 1969, siendo nombrado "Higgins Professor" en 1975.

ROBERT M. KRAUSS y SAM GLUCKSBERG ("Lenguaje social y no social") enseñan psicología en las universidades de Columbia y Princeton, respectivamente. Krauss se doctoró en la universidad de Nueva York. Profesó en Princeton, Harvard y Rutgers antes de ingresar en la facultad de Columbia en 1970. Ha investigado el campo del comportamiento interpersonal y la psicología social. Actualmente está estudiando el comportamiento verbal y no verbal que acompaña a situaciones de autopresentación, investigación que incluye acompañamientos no verbales de los intentos de engañar a otros, Glucksberg se doctoró, asimismo, en la Universidad de Nueva York y ha permanecido en Princeton desde 1963. Es coautor, con Joseph H. Danks, de la obra *Experimental Psycholinguistics*, que es una introducción general a la psicología del lenguaje. Sus investigaciones abarcan la solución de problemas y creatividad, la memoria en adultos y niños, la relación entre lenguaje y pensamiento y las estrategias y mecanismos usados por las personas en el entendimiento de discursos tanto hablados como escritos. En la actualidad está estudiando la forma en que las palabras y frases se representan en la memoria de los adultos.

HENRY A. LESTER ("La respuesta a la acetilcolina") es profesor adjunto de biología en el Instituto de Tecnología de California. "Me eduqué en Teaneck, New Jersey, y fui a la Universidad de Harvard, donde me interesé sobre todo por la física de partículas y por el teatro estudiantil. Después estudié como postgraduado en la Universidad de Rockefeller, en Nueva York, donde conseguí un Ph. D. en biofísica, trabajé en el laboratorio de H. K. Hartline, Floyd Rayliff y F. A. Dodge y me pasé mucho tiempo en los pequeños teatros neoyorquinos. Luego trabajé durante dos años en el Instituto Pasteur. Estoy, desde 1973, en el Instituto de Tecnología de California, que es un lugar interesantísimo para los profesionales de la neurobiología.





LA RUTA DE REDUCCION FOTOSINTETICA del nitrato a amoniaco es de naturaleza lineal y ocurre en dos pasos, vía nitrito. En su esclarecimiento han sido decisivas las aportaciones del Departamento de Bioquímica de la Universidad de Sevilla y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que dirige el autor. El molibdeno, como constituyente específico de la nitrato reductasa, desempeña un papel destacado en el primer paso de dicha reducción, pero no en el segundo. El tungsteno, en competencia con el molibdeno, ejerce un fuerte efecto inhibidor en el crecimiento del alga verde *Chlorella* cuando ésta crece en medios nutritivos con nitrato como fuente de nitrógeno *(arriba, izquierda)*. En cambio, el tungsteno no afecta al crecimiento del alga cuando los medios nutritivos contienen nitrito *(arriba, derecha)* o amoniaco *(abajo)*. Los cultivos tienen una concentración fija de molibdeno (0,1 μM) y concentraciones crecientes de volframio (0-1-10-100 μM).

Los distintos tipos de fotosíntesis y su regulación

La fotosíntesis consiste esencialmente en la fotolisis del agua por las plantas verdes y en la utilización del hidrógeno resultante para la asimilación controlada de los elementos biogenésicos primordiales

Manuel Losada

La vida es hermosa, frágil y fugaz como los irisados rayos de luz que maravillosamente la sostienen e impulsan desde sus más remotos orígenes por medio de la fotosíntesis. Gracias a este admirable proceso de universal alcance, el reino vegetal, partiendo de materiales pobres en energía, convierte incesantemente una fracción relativamente pequeña (0,1 por ciento), pero cuantitativamente muy significativa (10^{14} vatios), de la energía radiante que procedente del sol llega a la biosfera (10^{17} vatios) en energía química, y abastece posteriormente, en cadena, de materia rica en energía a todo el mundo vivo.

Es importante subrayar que las plantas no sólo surten de materiales estructurales a los organismos no fotosintéticos, sino que les suministran la energía química en ellos almacenada, indispensable para el mantenimiento de las actividades vitales y contenida originariamente, como energía electromagnética, en los rayos de sol. A la fotosíntesis se debe, pues, el milagro de que la energía luminosa del sol, antes de degenerar en calor y enfriarse a la temperatura de la tierra, quede transitoriamente almacenada como energía química biológica, en vez de disiparse y malgastarse directamente, sin beneficio alguno para los seres vivos.

Introducción

La fotosíntesis que realizan las algas y plantas verdes consiste, esencialmente, en la captación y conversión de la luz solar en energía electrónica y, subsiguientemente, en poder reductor y energía química de enlace, o, expresado en términos más amplios, en la utilización de la energía luminosa para la síntesis endergónica de compuestos inestables –materia orgánica y oxígeno molecular– a partir de otros más estables, a saber: agua, anhídrido carbónico, nitrato, sulfato y fosfato.

Las plantas clorofílicas toman del medio, como nutrientes, los elementos biogenésicos (hidrógeno, carbono, nitrógeno, azufre y fósforo) en su estado de máxima oxidación, y, gracias a la energía de la luz, reducen, con el hidrógeno del agua, el carbono a carbohidrato, el nitrógeno a amoniaco y el azufre a sulfuro, incorporándolos después en material celular. El fósforo, curiosamente, no cambia de valencia, sino que pasa de fosfato inorgánico a fosfato orgánico, rico en energía. Durante el proceso fotosintético, el oxígeno molecular –resultante de la fotodeshidrogenación del agua– se desprende, como producto de desecho, en cantidades estequiométricas, de acuerdo con la ecuación global:

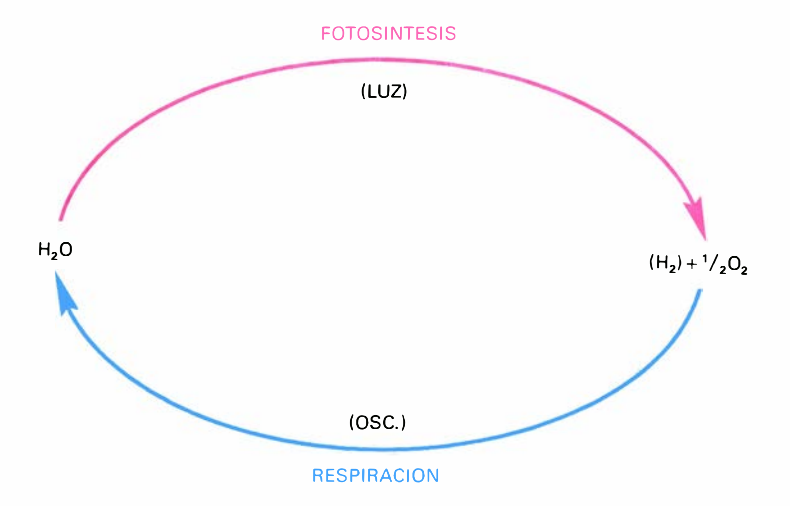
$$H_2O + aCO_2 + bNO_3^- + cSO_4^{2-} + dPO_4^{3-} \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} \text{material celular} + 1/2\ O_2$$

Los productos que por medio de la fotosíntesis fabrican para sí las plantas (hidratos de carbono, hidrocarburos, lípidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc.), y el oxígeno que simultáneamente liberan y eliminan al medio, sirven, a su vez, de manera directa o indirecta, como alimentos plásticos y energéticos a todos los demás seres que habitan el planeta.

Desde un punto de vista energeticonutricional, los organismos se distinguen, pues, primordialmente entre sí (a pesar de la unidad bioquímica que los caracteriza) por la clase de energía de que se alimentan, pudiendo clasificarse en dos grandes grupos de acuerdo con la naturaleza química o electromagnética de las fuentes energéticas que consumen. Los *organismos fotoergónicos* (algas y plantas superiores) convierten la *luz* en energía química fisiológica y pueden, por tanto, vivir a expensas de nutrientes totalmente desprovistos de potencial químico útil, a saber, agua, anhídrido carbónico y cenizas. Por el contrario, los *organismos quimioergónicos* (bacterias en general, hongos, animales) no pueden utilizar la luz como fuente de energía y dependen absolutamente de la *energía química* contenida en los sustratos –inorgánicos u orgánicos– de que se nutren, que igualmente transforman en energía química fisiológica. La luz solar es, en último término, la fuente primaria de energía que, a través del proceso fotosintético, mantiene a todo el mundo vivo desde casi sus comienzos.

El hecho de que los organismos fotoergónicos y quimioergónicos más evolucionados hayan desarrollado como *centrales energéticas* unos orgánulos citoplásmaticos altamente especializados (denominados, respectivamente, *cloroplastos* y *mitocondrias*), con objeto de convertir, con extraordinaria eficacia, la energía almacenada en la luz o en los nutrientes químicos en energía química fisiológica, es sólo una prueba de la importancia fundamental que las células conceden a sus procesos energéticos.

Sólo las plantas verdes, entre todos los organismos vivos, son capaces de romper el agua en hidrógeno y oxígeno. La *lisis del agua* por radiación al nivel energético de la luz visible es, por tanto, la más simple y primordial reacción ender-



CICLO FUNDAMENTAL de la bioenergética. Primero, las plantas rompen el agua (H_2O), a expensas de la energía de la luz, en sus dos elementos integrantes, hidrógeno (H_2) y oxígeno molecular (O_2), durante la fotosíntesis. Después, en la oscuridad, los organismos aeróbicos recombinan el hidrógeno con el oxígeno para obtener energía química de enlace durante la respiración.

gónica de la bioenergética; se trata de una reacción exclusiva de la fotosíntesis, de la que depende la vida de todos los demás organismos. Igualmente simple y esencial para la vida es la reacción exergónica inversa que, en la oscuridad, llevan a cabo los organismos quimioergónicos durante la respiración, con el fin de transformar la energía química redox almacenada en el hidrógeno (procedente de los alimentos que les suministran las plantas) y en el oxígeno (también de origen fotosintético) en energía química de enlace.

Las reacciones básicas de la fotosíntesis y la respiración implican, de hecho, una serie de transferencias de hidrógeno, cuesta arriba y cuesta abajo, a través de complejas cadenas de transporte de electrones, localizadas en los sistemas membranosos de los cloroplastos y las mitocondrias, con el resultado final de la rotura del agua en hidrógeno y oxígeno o en su resíntesis a partir de ellos, respectivamente. Los organismos fotoergónicos y quimioergónicos cierran, de este modo, lo que puede considerarse como el *ciclo fundamental de la bioenergética,* en el que el agua constituye tanto el sustrato primario de la fotosíntesis para la generación de poder reductor como el producto final de la respiración *(véase la ilustración de arriba).*

Hay otro aspecto energético, estrechamente relacionado con la fotosíntesis y de transcendental importancia para el presente y futuro del hombre, que conviene considerar aquí. En efecto, la energía solar almacenada en los *combustibles fósiles* –que han tenido igualmente su origen en la productividad fotosintética de las plantas durante los últimos tres mil millones de años – es la más importante fuente de energía que hoy día utiliza la humanidad, si bien insuficiente a plazo no muy lejano para sus necesidades exponencialmente crecientes. Al ritmo actual de consumo se prevé que las reservas existentes de gas y petróleo se agotarán en las próximas décadas, y, las de carbón, en un siglo. A esta crisis energética se une otra igualmente grave, motivada por la carencia de alimentos, y más concretamente de proteínas, para la nutrición suficiente y sana del género humano.

Aunque el hombre dispone ya de otras prometedoras fuentes de energía –principalmente, la nuclear–, hoy por hoy depende casi exclusivamente de la energía solar, fósil o actual, para satisfacer sus acuciantes necesidades energéticas y alimentarias. Si a esto añadimos que la energía solar es la más abundante, continua y limpia que poseemos, no cabe duda que es importante, y quizás indispensable, aprender a utilizarla prontamente de la manera más efectiva y rentable, imitando en lo posible el proceso fotosintético que con extraordinaria eficacia realiza la maquinaria clorofílica, especialmente adaptada para la fotoconversión. Se calcula que la energía solar que fija el reino vegetal en su conjunto equivale a unas 200 veces lo que en la actualidad produce la agricultura de todo el globo y consume la humanidad como alimentos, y a unas 10 veces lo que el mundo moderno gasta como energía.

Aunque, hasta la fecha, la explotación por el hombre de una fuente de energía tan poderosa como la solar ha sido muy limitada, las graves *crisis de energía y alimentos* a que acabamos de hacer referencia han provocado en la mayoría de los países avanzados una reacción muy positiva, en el sentido de estimular al máximo las investigaciones destinadas a un más amplio y profundo conocimiento de la fotosíntesis y a un mejor aprovechamiento de la energía solar. El bioenergetista conoce ya, de hecho, mucho sobre el mecanismo de la fotosíntesis como proceso de conversión de energía y sabe qué hace la bacteria, el alga o la planta para transformar eficientemente la energía solar en energía química o eléctrica. Sus conocimientos son, por ello, en cierto modo previos para que el ingeniero pueda ensayar las posibilidades tecnológicas que ofrece este maravilloso proceso. Si consiguiésemos aprovechar la energía solar con un rendimiento del 10 por ciento –valor que pueden alcanzar las plantas en periodos cortos y condiciones óptimas de campo–, a España le bastaría con el 1 por ciento de su superficie, es decir, con media provincia, para hacer frente a todas y cada una de sus necesidades energéticas.

Aparentemente, la única alternativa a la energía solar que podría representar también la solución definitiva al problema energético, y que equivaldría a tener un sol en la tierra, es la energía nuclear de fusión, ciertamente no exenta de dificultades y riesgos, y obstaculizada por serias objeciones políticas, sociales y económicas.

Evolución del concepto de fotosíntesis

Acaba de cumplirse el segundo centenario del descubrimiento de la fotosíntesis por el inglés Priestley. A lo largo de estos dos siglos, el concepto de fotosíntesis ha experimentado una continua evolución, con énfasis cada vez más acusado en su carácter de proceso de conversión de energía, consistente en esencia en reacciones de óxido-reducción promovidas por la luz y catalizadas por la clorofila.

El primero en intuir la función primordial de la luz solar como fuente de energía biológica fue el célebre médico alemán Mayer, quien, en 1845, tres años después de enunciar el principio de la conservación de la energía, formuló, sencilla y certeramente, la esencia del proceso fotosintético en los siguientes términos: "Las plantas son capaces de absorber y convertir la energía, pero no de crearla. El mundo vegetal constituye la despensa en que los efímeros rayos solares son fijados y almacenados para su

uso posterior; una medida económica providencial a la que va inexorablemente unida la propia existencia de la raza humana".

Durante mucho tiempo se identificó la fotosíntesis o función clorofílica con la asimilación del anhídrido carbónico y se pensó que la reacción clave del proceso era la rotura por la luz (fotolisis) del anhídrido carbónico en carbono y oxígeno molecular. A esta reacción de óxido-reducción seguiría la hidratación del carbono por el agua a hidrato de carbono, de acuerdo con las ecuaciones:

$$CO_2 \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} C + O_2$$

$$C + H_2O \longrightarrow (CH_2O)$$

El defensor más tenaz –y quizás ya el último en la historia– de la hipótesis de la fotolisis del dióxido de carbono ha sido el genial bioquímico alemán Warburg, quien influido por los grandes químicos de su época –sobre todo por Willstaeter y von Baeyer– defendió hasta su muerte –ocurrida hace pocos años– que la reacción básica de la fotosíntesis era precisamente la rotura por un cuanto de luz de una molécula de anhídrido carbónico, previamente activada. Por razones energéticas, Warburg se vio obligado a concluir que el sustrato de la fotolisis, o fotolito, no era propiamente el dióxido de carbono en su estado normal, sino el dióxido de carbono en un estado especialmente reactivo.

En efecto, cuando un hidrato de carbono típico, como la glucosa, se quema en un calorímetro en condiciones normalizadas, a temperatura y presión constantes, la reacción de combustión va acompañada de un desprendimiento de calor de 673 kilocalorías por mol, como consecuencia de la estabilización que tiene lugar al reorganizarse los enlaces entre los átomos, de acuerdo con la ecuación:

$$(CH_2O)_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O$$

La reacción es, pues, exotérmica, y su calor de reacción, o cambio de entalpía, viene dado por la expresión $\Delta H'_o = -673$ kcal/mol.

La reacción inversa, que es propia de la fotosíntesis, ocurre de acuerdo con la ecuación:

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} (CH_2O)_6 + 6\,O_2$$

y requiere, por tanto, una cantidad de energía igual a la liberada en la combustión, que se emplea en la inestabilización de los enlaces y queda almacenada en los productos de la reacción *(véase la ilustración de esta página)*. De hecho, puesto que la reacción sintética va acompañada de una ligera disminución de entropía –como consecuencia del ensamblaje de los átomos–, la energía libre que ha de consumir el proceso para realizarse es algo mayor que lo que indica su cambio de entalpía. La síntesis de glucosa y oxígeno a partir de anhídrido carbónico y agua es, pues, una reacción endergónica, que lleva consigo un cambio de energía libre, $\Delta F'_o = 686$ kcal/mol, ligeramente superior al valor que corresponde a su naturaleza endotérmica, $\Delta H'_o = 673$ kcal/mol. Es decir, la luz ha de suministrar, al menos, 686 kilocalorías por mol de hexahidrato de carbono sintetizado, o, lo que es igual, 114 kilocalorías por mol de monohidrato de carbono.

Teniendo en cuenta que la energía de 1 mol de cuantos (einstein) de luz roja de 680 nm (la más débil que puede producir eficazmente fotosíntesis) es de 42 kilocalorías, se puede, por tanto, calcular que la síntesis de una molécula de monohidrato de carbono requiere, al menos, 3 cuantos de luz roja.

Después de una serie impresionante de trabajos experimentales, Warburg concluyó rotundamente que el requerimiento de la fotosíntesis para la reducción de una molécula de dióxido de carbono era de sólo 3 cuantos y resumió la bioenergética del proceso afirmando que, en una naturaleza perfecta, la fotosíntesis era un proceso perfecto que ocurría con un rendimiento de casi el 100 por ciento.

Para explicar el mecanismo del proceso fotosintético, Warburg postuló que el dióxido de carbono daba lugar al verdadero fotolito al activarse previamente, en la oscuridad, en un proceso acoplado a otro exergónico que suministraba el suplemento energético equivalente a 2 cuantos. El fotolito, o dióxido de carbono activado, sufría entonces la lisis por la acción de 1 solo cuanto de luz:

$$(CO_2)^* \xrightarrow[\text{clorofila}]{1\,h\nu} C + O_2$$

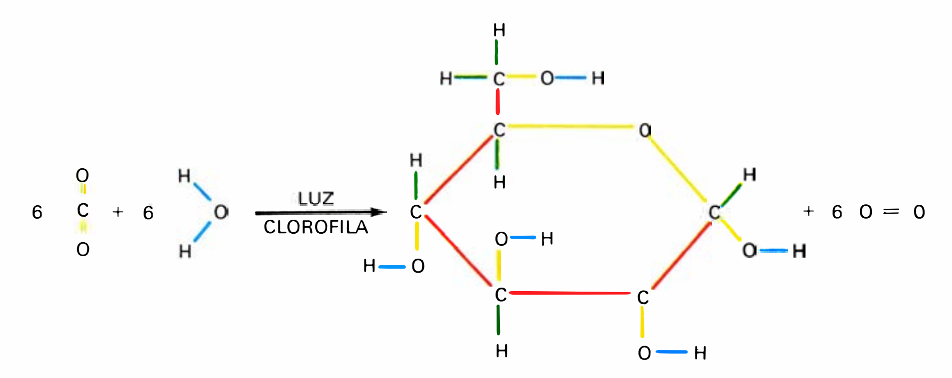
La polarización exagerada –sobre todo por razones históricas y cuantitativas– de la atención de los fisiólogos y bioquímicos interesados en el estudio de la fotosíntesis en la asimilación del anhídrido carbónico determinó paralelamente, en sentido inverso, el que hasta hace pocos años se ignorase casi totalmente el hecho fundamental de que las células verdes fabrican sus biomoléculas más representativas –proteínas y ácidos nucleicos– no sólo a partir de dióxido de carbono, sino también de otros nutrientes inorgánicos igualmente oxidados al límite, en concreto nitrato y sulfato, que, antes de incorporarse al material celular, han de fotorreducirse de manera más o menos directa a amoniaco y sulfuro, respectivamente, de acuerdo con las reacciones:

$$NO_3H + H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} NH_3 + 2\,O_2$$

$$SO_4H_2 \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} SH_2 + 2\,O_2$$

Por lo que concierne a la asimilación fotosintética del nitrato, baste considerar por el momento que la reducción del nitrógeno nítrico a amoniacal y su incorporación como grupo α-amino en aminoácidos requiere $8 + 2 = 10$ electrones, frente a 4 electrones que requiere la reducción del carbono del anhídrido carbónico a carbohidrato. En consecuencia, si partimos del dato experimental de que las algas en crecimiento contienen 8 por ciento de nitrógeno y 50 por ciento de carbono, podemos fácilmente deducir que, en estos microorganismos, una parte del poder reductor originado en las reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis se emplea en reducir al nitrógeno por cada tres partes en reducir al carbono.

Paradójicamente, quizás una de las razones principales por las que, hasta ahora, se ha relegado a un plano muy secundario la posible relación entre la asimilación del nitrato y la fotosíntesis



REESTRUCTURACION DE ENLACES durante la fotosíntesis de glucosa ($C_6H_{12}O_6$) y oxígeno molecular (O_2) a partir de dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). La luz suministra la energía libre que requiere la reacción para que se formen enlaces más inestables (O-O, C-C, C-H) a partir de otros más estables (H-O, C-O) y para que disminuya la entropía del sistema reaccionante.

ha provenido de la idea preconcebida –y defendida tenazmente por muchos seguidores de Warburg– de que, en contraste con la reducción del carbono, la reducción del nitrógeno debía estar muy alejada de las reacciones fotosintéticas propiamente dichas y ocurrir fuera del aparato fotosintético. En 1920, Warburg realizó el descubrimiento fundamental (confirmado más tarde por él mismo, en 1965) de que las células vivas del alga verde *Chlorella,* suspendidas en una solución de nitrato a la que no se añadía anhídrido carbónico, desprendían oxígeno en la luz con la reducción concomitante del nitrato a amoniaco. Sin embargo, Warburg –defensor acérrimo de la hipótesis de la fotolisis del dióxido de carbono como reacción básica de la fotosíntesis– interpretó la reducción fotosintética del nitrato como el resultado neto de su reducción en la oscuridad por carbohidratos celulares, seguida de la escisión en la luz del dióxido de carbono resultante, de acuerdo con las ecuaciones:

$$NO_3H + 2(CH_2O) \longrightarrow NH_3 + 2CO_2 + H_2O$$

$$2CO_2 + 2H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} 2(CH_2O) + 2O_2$$

$$NO_3H + H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} NH_3 + 2O_2$$

En consecuencia, se aceptaba, sin pruebas convincentes ni suficiente rigor científico, que los carbohidratos constituían los primeros productos de la fotosíntesis, y que ellos, a su vez, servían de fuente inmediata de poder reductor para la posterior reducción del nitrato. Como analizaremos más adelante, la realidad ha demostrado, sin embargo, que esta interpretación no era correcta, y que, de hecho, la reducción fotosintética del nitrato es mucho más directa que la del anhídrido carbónico, pudiendo considerarse como uno de los ejemplos más simples y relevantes de fotosíntesis.

Un avance vertiginoso en el esclarecimiento de la fotosíntesis se inició en 1931 con los trabajos del incisivo microbiólogo van Niel, de la Estación Marina Hopkins de la Universidad de Stanford, al aplicar los conceptos de la bioquímica comparada a sus estudios con bacterias fotosintéticas. Van Niel llegó a la conclusión fundamental de que la reacción básica de la fotosíntesis no era la fotolisis del dióxido de carbono sino la fotolisis del agua, que en las algas y plantas superiores resultaba en la formación de poder reductor, (H_2) y oxígeno molecular, de acuerdo con la ecuación:

$$H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} (H_2) + 1/2\ O_2$$

donde (H_2) representa, más bien que hidrógeno molecular propiamente, poder reductor unido a coenzimas de óxido-reducción de potencial próximo al del electrodo de hidrógeno (–0,42 V).

De acuerdo con van Niel, tanto la reducción fotosintética del carbono como la del nitrógeno deberían tener lugar más tarde, en reacciones oscuras, a expensas del poder reductor originado en la fotolisis del agua.

La hipótesis de van Niel recibió años más tarde fuerte apoyo experimental cuando Hill, de la Universidad de Cambridge, obtuvo preparaciones de cloroplastos que catalizaban en la luz la reducción de sales férricas y otros aceptores de hidrógeno, A, de acuerdo con la ecuación general:

$$A + H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} AH_2 + 1/2\ O_2$$

hoy universalmente conocida, en su honor, con el nombre de reacción de Hill. Otra prueba contundente a favor de la hipótesis de van Niel la consiguieron Ruben y Kamen, de la Universidad de California, en Berkeley, por los años 40, al demostrar, mediante el uso de isótopos, que el oxígeno que se desprendía en la fotosíntesis tenía su origen en la molécula de agua y no en la de dióxido de carbono.

En resumen, el agua, que, a partir de los experimentos de van Helmont (seguramente los primeros en la historia de la Biología), empezó siéndolo todo en nutrición vegetal y que, durante siglos, quedó reducida a un papel secundario en la hidratación del carbono, ha pasado finalmente a ser casi todo en el proceso fotosintético propiamente dicho, en tanto que el anhídrido carbónico, que llegó a serlo todo al comienzo del estudio de la fotosíntesis, ha quedado reducido a un mero aceptor de hidrógeno en una reacción oscura.

ESQUEMA DEL FLUJO cíclico y no-cíclico de electrones propio de las reacciones luminosas de la fotosíntesis. En el flujo no-cíclico participan en serie los 2 fotosistemas II y I, interconectados por una cadena de transporte. La transferencia contra el gradiente de potencial (E'_o) de 1 electrón (e) del agua (H_2O), que se oxida a oxígeno molecular (O_2), a la ferredoxina (Fd) requiere, por tanto, 2 cuantos de luz. En el flujo cíclico participa sólo el fotosistema I, cuyo centro de reacción fotoactivado cede 1 electrón a la ferredoxina y lo acepta nuevamente de ella misma a través de una cadena de transporte. En ambos casos, la energía liberada en la caída de los electrones se emplea en la síntesis química de enlaces de fosfato ricos en energía (~P) a partir de fosfato inorgánico (Pi).

La fotosíntesis del poder asimilatorio

Hoy sabemos, gracias fundamentalmente a los trabajos de Arnon y su grupo, de la Universidad de California, en Berkeley, que las reacciones más características de la fotosíntesis –con las

que prácticamente termina la fase luminosa del proceso– incluyen no sólo la *fotolisis del agua* en poder reductor y oxígeno molecular, sino la *fotofosforilación* del fosfato inorgánico (P_i) en fosfato orgánico (~ P). Arnon ha denominado, en conjunto, al *poder reductor* (H_2) y a los *enlaces de fosfato ricos en energía* (~ P), *poder asimilatorio,* ya que, como analizaremos en el apartado siguiente, permiten la reducción y posterior asimilación de los elementos biogenésicos primordiales: carbono, nitrógeno y azufre.

En esencia, las reacciones luminosas de la fotosíntesis consisten en un flujo de electrones, dirigido por la luz y sensibilizado por los sistemas de pigmentos, que resulta en la deshidrogenación del agua y se acopla con la formación de energía química de enlace *(véase la ilustración de la página 10).* Si el flujo de electrones es cíclico y transcurre por un circuito cerrado, el proceso implica sólo el fotosistema I y produce únicamente enlaces de fosfato ricos en energía, por lo que se denomina *fotofosforilación cíclica.* En cambio, si el circuito es abierto, el proceso implica los dos fotosistemas I y II, y resulta no sólo en la formación de energía de enlace sino en la oxidación del agua –que actúa de dador de electrones al comienzo de la cadena de transporte– y en la reducción de un aceptor primario, A, –que actúa de aceptor al final de la cadena–, por lo que se denomina *fotofosforilación no-cíclica.* Ambos procesos pueden resumirse de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

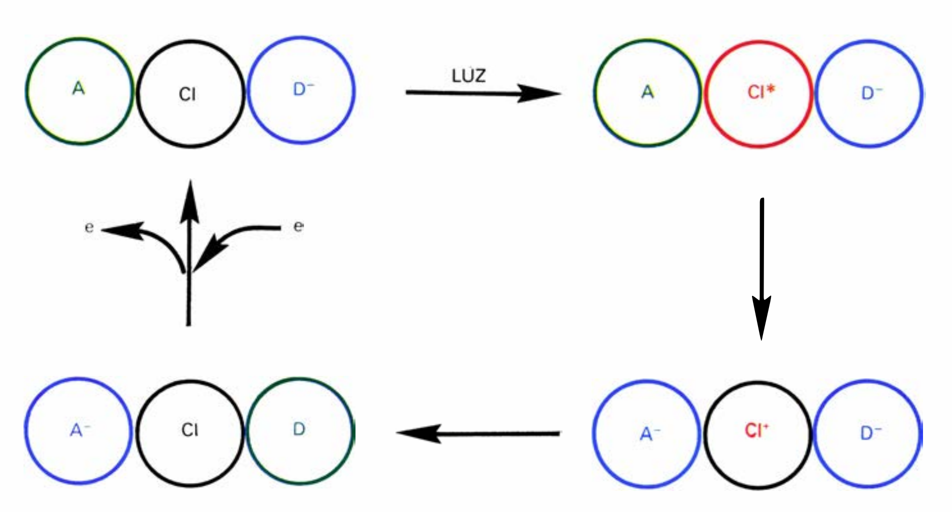
$$P_i \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} \sim P$$

$$A + H_2O + P_i \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} AH_2 + 1/2\, O_2 + \sim P$$

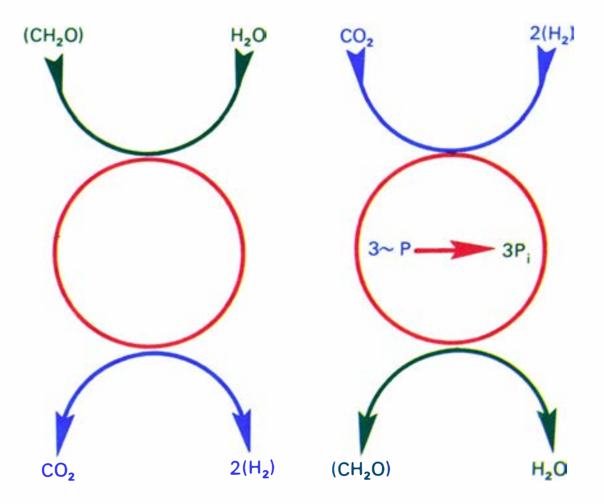
San Pietro, Arnon y sus colaboradores han aislado y caracterizado lo que se considera el primer aceptor terminal de electrones, A, de la cadena de transporte. Se trata de una sulfoferroproteína soluble de bajo peso molecular y potencial similar al del electrodo de hidrógeno, que, de acuerdo con su función, se ha denominado ferredoxina. Parece, no obstante, que existen una o más sulfoferroproteínas ligadas al centro de reacción del fotosistema I que pueden actuar –incluso a la temperatura del nitrógeno líquido– como aceptores primarios de los electrones activados, antes de que éstos sean finalmente transferidos a la propia ferredoxina.

Los primeros actos de la fotosíntesis son de naturaleza física y casi instantáneos (del orden de 10^{-15} a 10^{-6} segundos), y se inician con la absorción de los fotones por los pigmentos principales (clorofila *a*) y accesorios de los *fotosistemas* del aparato fotosintético. Las moléculas de los pigmentos, funcionando a modo de antenas, captan la energía luminosa, se excitan a un estado inestable, expeliendo un electrón a un orbital más externo, y transfieren los cuantos absorbidos –que emigran, como excitones, más o menos en zigzag, a través de las moléculas de clorofila *a*– hasta que son finalmente atrapados por los centros colectores (verdaderos sumideros energéticos) de los fotosistemas, en los que tienen lugar las reacciones fotoquímicas primarias de la fotosíntesis.

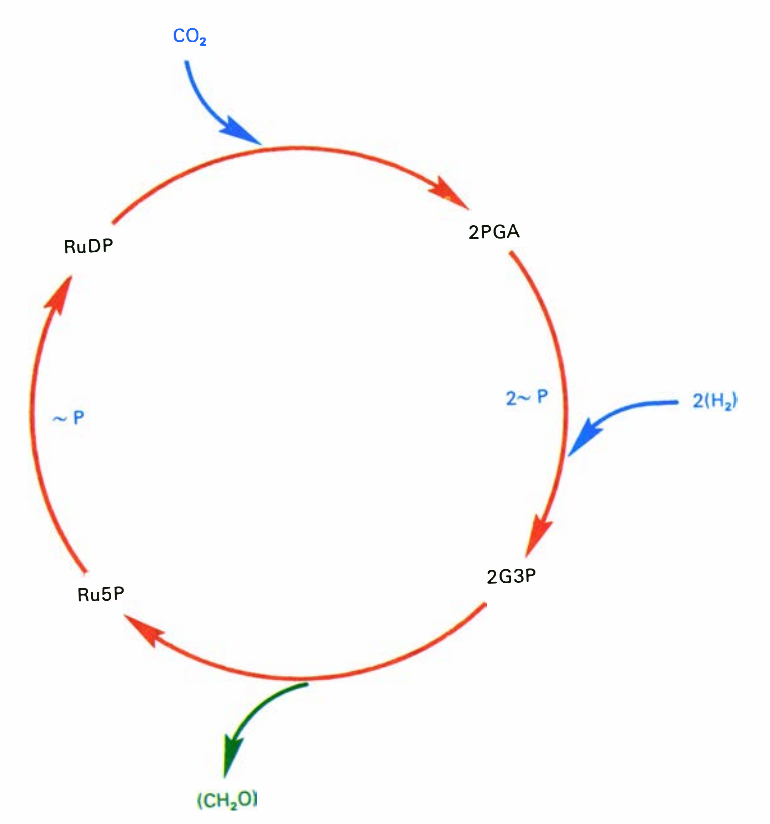
Los *centros de reacción* de los fotosistemas son moléculas especiales de clorofila *a* (Cl) que actúan como trampas energéticas de los fotones absorbidos y convierten la energía luminosa en energía química, al transferir, en su estado excitado (Cl*), un electrón a sus respectivos aceptores primarios de electrones (A) y quedar ellas mismas oxidadas (Cl^+), en condiciones de aceptar un nuevo electrón de sus donadores (D^-) *(véase la ilustración superior de esta página).* El aceptor primario de electrones del fotosistema II, todavía no completamente identificado, se suele designar por Q (del inglés "quencher", atenuador de fluorescencia).



LAS REACCIONES FOTOQUIMICAS de la fotosíntesis ocurren en los centros de reacción de los fotosistemas. Cada centro de reacción está constituido por una molécula de clorofila *a* especial (Cl), estrecha y específicamente asociada con un aceptor primario (A) y un donador de electrones (D^-). La clorofila se activa al absorber un fotón (Cl*), y en su estado fotoexcitado cede un electrón al aceptor, que se reduce (A^-) a la par que ella se oxida (Cl^+). A continuación, el donador reduce la clorofila oxidada a su estado inicial y pierde un electrón (D). El centro de reacción se regenera finalmente cuando el aceptor reducido y el donador oxidado retornan a sus formas originales al perder y ganar, respectivamente, su electrón (e) en exceso o en defecto, por interacción con los sistemas redox vecinos de los pertinentes fotosistemas I y II.



ESQUEMA DE LA DESHIDROGENACION exergónica por los piridin-nucleótidos de un monohidrato de carbono (CH_2O) a dióxido de carbono (CO_2) por el ciclo oxidativo de las pentosasas *(izquierda)* y de la hidrogenación endergónica –con requerimiento de 3 enlaces ~P– del dióxido de carbono a monohidrato de carbono por ciclo reductivo de las pentosas *(derecha).*



LA RUTA DE LA ASIMILACION del carbono por el ciclo reductivo de las pentosas aparece aquí simplificada. Primero, el anhídrido carbónico (CO_2) se fija a una molécula de pentosa previamente activada por fosforilación, la ribulosa-difosfato (RuDP), que se escinde en 2 moléculas de ácido 3-fosfoglicérico (PGA). Después, las 2 moléculas de ácido 3-fosfoglicérico resultantes se reducen, previa activación por fosforilación de sus grupos carboxilos, a 2 moléculas de gliceraldehído-3-fosfato (G3P). Finalmente, las dos moléculas de triosa se reajustan y liberan 1 fragmento de monohidrato de carbono (CH_2O), a la par que regeneran la ribulosa-5-fosfato (Ru5P).

Teniendo en cuenta la energía de la luz roja se puede calcular que una molécula de clorofila *a* excitada por un cuanto de esa longitud de onda equivale, en principio, a una especie de batería eléctrica de cerca de 2 V de potencial. Razonamientos termodinámicos permiten, sin embargo, concluir que la eficiencia energética máxima de la conversión fotoquímica alcanza aproximadamente 1,2 eV por fotón absorbido, es decir, casi el 70 por ciento. De hecho, experimentalmente resulta *(véase la ilustración de la página 10)* que la diferencia de potencial que suministran los pigmentos fotoexcitados de los centros de reacción de los fotosistemas es de 1,0 V, y que el del fotosistema I genera un reductor fuerte (-0,6 V), suficiente para reducir la ferredoxina (-0,42 V), y el del fotosistema II un oxidante fuerte (+1,0 V), suficiente para oxidar el agua (+0,82 V).

Cuando el electrón expulsado de su orbital en la molécula de clorofila *a* del centro de reacción del fotosistema I es captado por la ferredoxina, la propia clorofila queda cargada positivamente y en condiciones de aceptar nuevamente un electrón. Si el electrón captado por la ferredoxina vuelve entonces a su origen dando un rodeo y pasando por una serie de estaciones transformadoras –a través de una cadena de transporte que incluye citocromos como mediadores– se produce la conversión de la energía redox acumulada en energía química, que la célula almacena finalmente, bajo la forma de enlaces de pirofosfato, como adenosintrifosfato, o ATP.

En cambio, si la molécula de clorofila oxidada del fotosistema I neutraliza su carga positiva con electrones procedentes en último término del agua –gracias al concurso del fotosistema II fotoactivado y de una nueva cadena de transporte– tiene lugar un flujo no-cíclico, y por tanto abierto, de electrones, que permite, por un lado, la oxidación del agua, con desprendimiento de oxígeno molecular y, por otro, la síntesis de poder reductor, como ferredoxina reducida.

El poder reductor del agua (E'_o, pH 7, +0,82 V) exige, ciertamente, para que sus electrones puedan ser transferidos a la clorofila oxidada del fotosistema I (E'_o, pH 7, +0,4 V), que sean previamente activados en una segunda reacción fotoquímica, catalizada igualmente por una forma especial de clorofila *a*, asociada con el complejo de pigmentos que constituye el fotosistema II. En el transporte fotosintético de electrones que resulta en la fotolisis del agua, la misión primordial del fotosistema I es, pues, suministrar electrones a la ferredoxina, y, la del fotosistema II, sustraerlos del agua y transferirlos al fotosistema I. La interconexión entre ambos fotosistemas se efectúa por medio de una serie de transportadores (plastoquinona, citocromos, plastocianina) que permiten la caída de los electrones desde el nivel más reducido del fotosistema II al más oxidado del fotosistema I. La energía que se libera durante este transporte no-cíclico de electrones es también captada por los sistemas fosforilantes fotosintéticos y almacenada, bajo la forma de enlaces de pirofosfato, como ATP.

La reducción fotosintética del carbono, nitrógeno y azufre

Como hemos analizado previamente, la ferredoxina reducida y los enlaces de fosfato ricos en energía constituyen, en cierto modo, los productos finales de la fotosíntesis propiamente dicha, a expensas de los cuales tiene lugar después, ya en la oscuridad, la reducción y posterior asimilación de los elementos biogenésicos primordiales. Sin embargo, no siempre suministra la ferredoxina reducida directamente el poder reductor necesario para la reducción del carbono, nitrógeno y azufre inorgánicos, sino que, a veces, y según los organismos, el proceso reductivo tiene lugar a través de coenzimas redox algo más positivos (E'_o, pH 7, -0,32 V) y de universal distribución en las células, denominados nicotinamida-adenin-dinucleótidos, o sea, en forma abreviada, $NAD(P)^+$ y NAD(P)H, en sus formas oxidadas y reducidas, respectivamente. En cuanto a la participación de los enlaces de fosfato ricos en energía en la reducción de estos elementos inorgánicos, puesto que algunos de los pares redox implicados presentan un potencial altamente negativo, no basta simplemente, en todos los casos, con el poder reductor que suministran la ferredoxina o los nucleótidos, sino que, para que proceda la pertinente reacción de óxido-reducción, es preciso el concurso del ATP, que permite superar la naturaleza endergónica del proceso.

La *ruta de reducción fotosintética del carbono* hasta el nivel de azúcar (que después ha resultado ser la misma que ocurre en los organismos quimioergónicos que utilizan CO_2 como fuente de carbono) es de carácter cíclico y fue descubierta en los años 50 por Calvin y su grupo en la Universidad de California, en Berkeley. En contraste con el ciclo oxidativo de las pentosas, se le denomi-

na también *ciclo reductivo de las pentosas,* pues ambos son fundamentalmente procesos inversos, aunque de naturaleza disimilatoria y asimilatoria, respectivamente *(véase la ilustración de la página 11).* En efecto, la ruta por la que la glucosa es catabolizada a través del ciclo oxidativo de las pentosas es exergónica, y ocurre de acuerdo con la reacción global simplificada:

$$(CH_2O) + H_2O \longrightarrow CO_2 + 2(H_2).$$

Su principal propósito es generar, con fines biosintéticos, poder reductor bajo la forma de NADPH; sus pasos más característicos son el primero y el segundo, que catalizan, respectivamente, una deshidrogenación simple y una deshidrogenación descarboxilativa. Puesto que el equilibrio de ambas reacciones, en conjunto, está muy desplazado en la dirección de la deshidrogenación y descarboxilación, la reversión del ciclo ha de evitar necesariamente estos dos pasos y consumir ATP. En consecuencia, la ruta por la que se sintetiza la glucosa, a partir de CO_2 y NADPH, a través del ciclo reductivo de las pentosas, requiere 3 enlaces de fosfato ricos en energía y el concurso de una combinación de enzimas fosforilantes, reductores y defosforilantes, de acuerdo con la ecuación:

$$CO_2 + 2\,(H_2) \xrightarrow{3\sim P} (CH_2O) + H_2O$$

No se trata, pues, simplemente, de la desoxigenación e hidrogenación por 2 pares de hidrógeno del CO_2 a formaldehido, como pudiera sugerir erróneamente la ecuación simplificada anterior. En el reajuste real de los grupos (CH_2O) durante el ciclo participan derivados azucarados de 3, 4, 5, 6 y 7 átomos de carbono, que intercambian fragmentos de 2 y 3, apareciendo generalmente al final el carbono reducido como glucosa activa, que se polimeriza a almidón *(véase la ilustración de la página 12).*

En la luz, los cloroplastos llevan a cabo la síntesis total de carbohidratos, a partir de CO_2 y poder asimilatorio, por medio del ciclo reductivo de las pentosas, pero en la oscuridad puede operar el ciclo oxidativo para generar poder reductor, estando perfectamente regulada la coordinación de ambos procesos.

Algunas plantas, como el maíz y la caña de azúcar, han desarrollado el ciclo auxiliar de los ácidos C_4–dicarboxílicos, que permite la translocación celular del CO_2 y, de esta manera, coopera con el ciclo reductivo de las pentosas en la asimilación del CO_2 *(véase la ilustración de esta página).* En las plantas con este ciclo –conocido también como ciclo de Hatch y Slack–, los cloroplastos de las células del mesófilo, situado bajo la superficie foliar, incorporan CO_2 y poder reductor en malato a partir de piruvato, en una serie endergónica de reacciones, que requiere ATP. El malato es entonces transportado a las células de la vaina de los haces vasculares, cuyos cloroplastos liberan el CO_2 y NADPH fijados previamente, separando, al mismo tiempo, el piruvato, que, presumiblemente, retorna de nuevo a las células del mesófilo. El CO_2 es finalmente reducido a carbohidrato por la ruta de las pentosas. Además del grupo de plantas C_4 del tipo malato existe otro más numeroso del tipo aspartato, que utiliza este aminoácido dicarboxílico como metabolito transportador de CO_2.

Arnon y colaboradores han encontrado una nueva vía metabólica, denominada *ciclo reductivo de los ácidos tricarboxílicos,* que constituye otro mecanismo, independiente del ciclo reductivo de las pentosas, para la asimilación del CO_2 en la fotosíntesis bacteriana *(véase la ilust. sup. de la página 14).* Este ciclo produce acetato activo (es decir, acetato activado por su unión con el coenzima A) a partir de 2 moléculas de CO_2 y 8 equivalentes de poder reductor (2 como ferredoxina, 4 como nucleótidos de nicotinamida y 2 como nucleótidos de flavina) de acuerdo con la ecuación global simplificada:

$$2\,CO_2 + 8\,(H) \xrightarrow{2\sim P} (CH_3\text{-}COOH) + 2\,H_2O$$

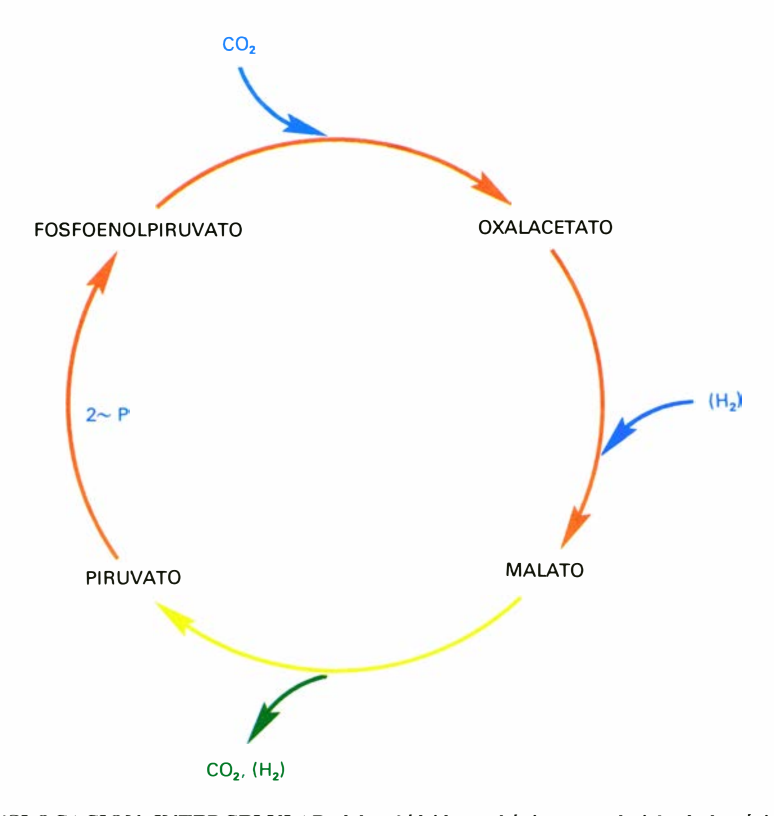
El nuevo ciclo es, pues, de naturaleza endergónica, y representa una reversión del ciclo oxidativo de los ácidos tricarboxílicos, que ocurre de acuerdo con la reacción exergónica:

$$(CH_3\text{-}COOH) + 2H_2O \xrightarrow[\sim P]{} 2CO_2 + 4(H_2)$$

Los dos enzimas que permiten cortocircuitar los pasos irreversibles del ciclo de Krebs son los que catalizan la síntesis dependiente de ferredoxina del α-cetoglutarato y la lisis dependiente de ATP del citrato *(véase la ilust. inf. de la página 14).* Las bacterias fotosintéticas poseen además otro enzima específico, que lleva a cabo, posteriormente, la síntesis de piruvato por carboxilación reductiva, dependiente de ferredoxina, del acetato activo, de acuerdo con la reacción:

$$(CH_3\text{-}COOH) + CO_2 + 2(H) \longrightarrow CH_3\text{-}CO\text{-}COOH + H_2O$$

La *ruta de reducción fotosintética del nitrógeno* es de naturaleza lineal y en su



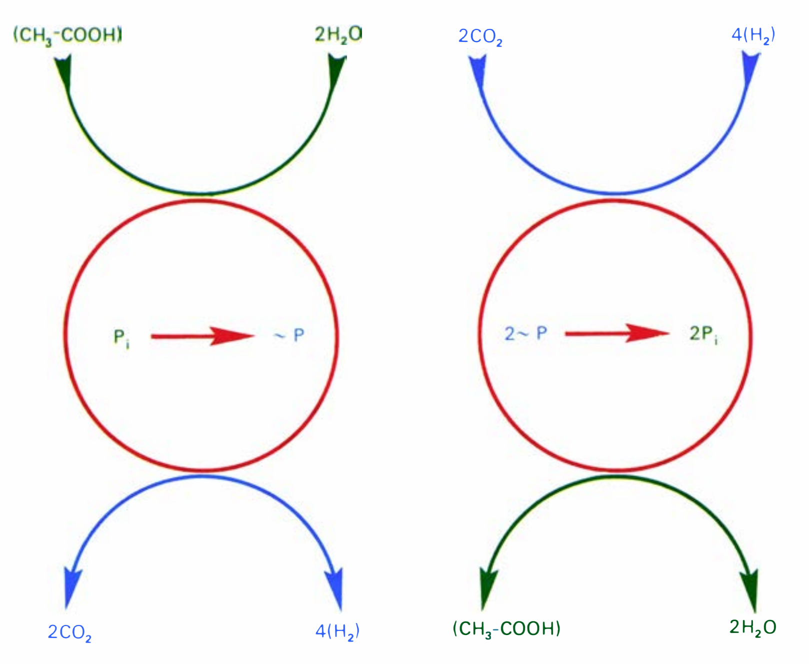
TRANSLOCACION INTERCELULAR del anhídrido carbónico por el ciclo de los ácidos C_4-dicarboxílicos. Primero *(rojo),* **los cloroplastos de las células del mesofilo incorporan el anhídrido carbónico (CO_2) al piruvato previamente activado por fosforilación, o fosfoenol-piruvato, y forman oxalacetato, que se reduce a malato. Después** *(amarillo),* **el malato pasa a las células de la vaina de los hacecillos vasculares, en cuyos cloroplastos sufre una descarboxilación oxidativa y regenera el piruvato, que retorna a las células del mesofilo para repetir nuevamente el ciclo.**

esclarecimiento han sido decisivas las aportaciones de nuestro Departamento de Bioquímica, de la Universidad de Sevilla y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, durante los últimos 15 años. El nitrato se reduce a amoniaco en una reacción fuertemente exergónica, que no requiere adenosintrifosfato:

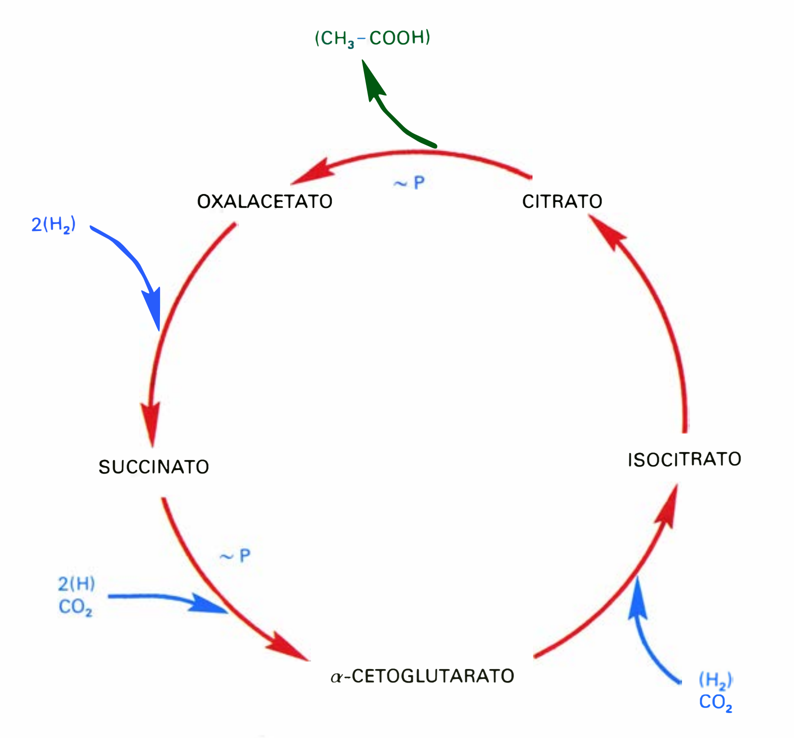
$$NO_3^- + 2\ H^+ + 8\ (H) \longrightarrow NH_4^+ + 3\ H_2O$$

Como muestra el siguiente esquema, la reducción asimilatoria del nitrato ocurre en dos estadios: primero, el nitrato se reduce a nitrito, en una reacción catalizada por la molibdoproteína nitrato reductasa, y, a continuación, el nitrito se reduce a amoniaco en una reacción catalizada por la ferroproteína nitrito reductasa:

$$NO_3^- \xrightarrow{2e^-} NO_2^- \xrightarrow{6e^-} NH_4^+$$



ESQUEMA DE LA DESHIDROGENACION exergónica –acoplada a la formación de 1 enlace ≃P– del acetato activo (CH_3-COOH) a dióxido de carbono (CO_2) por el ciclo oxidativo de los ácidos tricarboxílicos *(izquierda)* **y de la hidrogenación endergónica –con requerimiento de 2 enlaces ~P– del dióxido de carbono a acetato activo por el ciclo reductivo inverso** *(derecha).*



LA RUTA DE LA ASIMILACION del carbono por el ciclo reductivo de los ácidos tricarboxílicos se muestra aquí esquematizada. Primero, una molécula de dióxido de carbono (CO_2) se fija por carboxilación reductiva dependiente de ATP en una molécula de succinato, que proviene de la hidrogenación dos veces repetida del oxalacetato. Después, el α-cetoglutarato resultante sufre una nueva carboxilación reductiva a isocitrato seguida de su isomerización a citrato. Finalmente, el citrato se escinde en una reacción, dependiente de ATP, que, por un lado, libera el acetato activo (CH_3-COOH) y, por otro, regenera el oxalacetato, que vuelve a iniciar de nuevo el ciclo.

En las algas verde-azuladas, los 2 enzimas que integran el sistema reductor de nitrato están íntimamente ligados a las partículas fotosintéticas y son dependientes de ferredoxina como donador de electrones, mientras que en las algas eucarióticas y en las plantas verdes la nitrato reductasa, de localización intracelular incierta, depende de NAD (P)H *(véase la ilust. sup. de la página 15)*, en tanto que la nitrito reductasa, localizada en los cloroplastos, depende de ferredoxina *(véase la ilust. inf. de la página 15)*.

Interesa destacar el papel esencial del *molibdeno*, como constituyente específico de la nitrato reductasa, en la reducción del nitrato. En relación con ello merece particular atención –especialmente por cuanto atañe a posibles repercusiones prácticas– la inhibición que ejerce el volframio, como antagonista del molibdeno, en el crecimiento de algas y plantas superiores en medios con nitrato.

El volframio, a concentraciones tan bajas como 10 μM, inhibe totalmente el crecimiento del alga *Chlorella* cuando la fuente de nitrógeno es nitrato. En cambio, si se sustituye el nitrato por nitrito o amoniaco, el efecto "algicida" del volframio desaparece totalmente, lo que indica que el papel del molibdeno en la asimilación del nitrato parece limitarse a la reducción del nitrato a nitrito.

En cuanto a la nitrito reductasa, su propiedad más sobresaliente es la capacidad de catalizar una reacción de transferencia de 6 electrones. Hasta hoy, sólo otras dos ferroproteínas comparten esta facultad: la sulfito reductasa, que reduce sulfito a sulfuro, y la nitrogenasa, que reduce nitrógeno molecular a amoniaco. Tanto la nitrito reductasa como la sulfito reductasa se caracterizan, además, por poseer, como grupo prostético funcional común, un nuevo hemo, identificado por Kamin y colaboradores, de la Universidad de Duke, Carolina del Norte, como *sirohemo (véase la ilust. sup. de la página 16)*.

Los resultados de Miflin y Lea, de la Estación Experimental de Rothamsted, Inglaterra, sugieren que el amoniaco formado en la reducción fotosintética del nitrato se incorpora primero en glutamina (como grupo amida, en una reacción que requiere ATP) y, después, en

glutamato (como grupo α-amino, en una transaminación reductiva dependiente de ferredoxina) de acuerdo con las reacciones:

$$NH_3 + \text{glutamato} \xrightarrow{\sim P} \text{glutamina}$$

$$\text{glutamina} + \alpha\text{-cetoglutarato} + 2(H) \longrightarrow 2 \text{ glutamato}$$

$$NH_3 + \alpha\text{-cetoglutarato} + 2(H) \xrightarrow{\sim P} \text{glutamato}$$

La *ruta de reducción fotosintética del azufre* ha sido objeto de particular atención durante los últimos años por los grupos de Bandurski, de la Universidad de Michigan, y de Trebst, de la Universidad de Bochum. Aunque todavía no está definitivamente establecida, parece ocurrir en dos pasos de 2 y 6 electrones, respectivamente, de acuerdo con la siguiente secuencia, lineal o cíclica, de reacciones, que incluye sulfito y sulfuro, en forma combinada o libre:

$$SO_4^{2-} \xrightarrow{2e} SO_3^{2-} \xrightarrow{6e} SH_2$$

El poder reductor lo suministra, en principio, la ferredoxina reducida en la luz, directamente o a través de NADPH. La reacción conjunta es endergónica y requiere al menos 2~ P, tal vez 3, puesto que ha de salvar el primer paso "cuesta arriba" de reducción del sulfato a sulfito, merced a una activación previa del sulfato por adenililación, seguida quizá de una posterior fosforilación:

$$SO_4^{2-} + 2H^+ + 8(H) \xrightarrow{3\sim P} SH_2 + 4H_2O$$

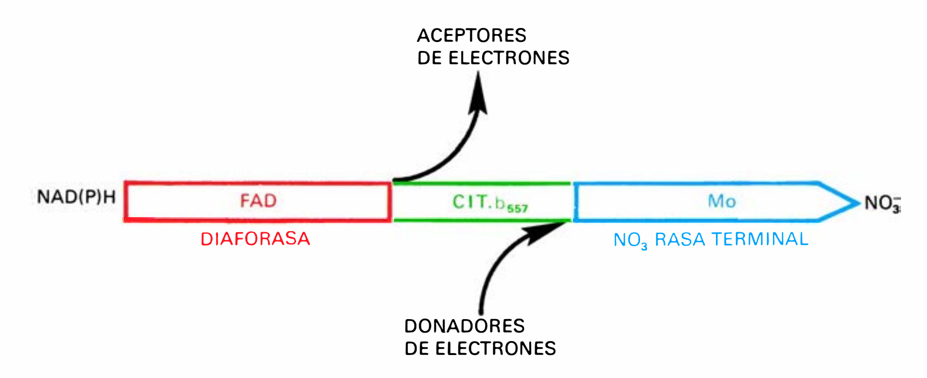
Poder reductor y regulación de la fotosíntesis

La complejidad de las reacciones fotosintéticas implicadas en la generación de poder asimilatorio –poder reductor y energía química de enlace– y en la posterior reducción y asimilación del carbono, nitrógeno y azufre, así como las intrincadas interrelaciones entre las diversas rutas metabólicas propias de las células verdes, demanda la existencia de múltiples sitios reguladores para coordinar la velocidad de las reacciones claves. Las investigaciones a nivel celular, subcelular y enzimático, realizadas durante los últimos años en diferentes laboratorios han puesto de manifiesto la precisión y eficacia de los mecanismos de control a que está sujeta, en su conjunto, la fotosíntesis. La evidencia actual sugiere que un tipo generalizado de regulación de las células fotosintéticas está primariamente inducido por la luz y mediado, ante todo, por fluctuaciones en el estado redox y en la carga energética celular. Asimismo parece que los cambios de pH y de la concentración de ciertos iones y metabolitos cruciales desempeñan también un papel primordial en la regulación de la fotosíntesis.

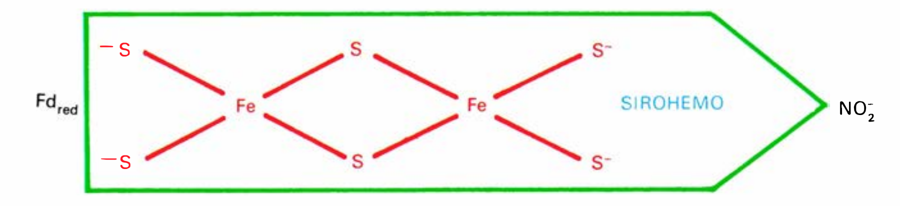
Aparte del control, bien conocido dede hace años, del flujo fotosintético de electrones por la presencia de adenosindifosfato (ADP) y fosfato inorgánico, Arnon y colaboradores han encontrado recientemente que la fotofosforilación cíclica está regulada por el estado redox de los transportadores que participan en el proceso, a los que mantienen en un punto óptimo la oxidación por el oxígeno molecular y la reducción por el NADPH y la ferredoxina.

Por lo que respecta al ciclo reductivo de las pentosas y al auxiliar de los ácidos C_4-dicarboxílicos parece que sus enzimas claves están reversiblemente regulados por la intensidad de la luz, activándose rápidamente por la iluminación e inactivándose en la oscuridad. Aparentemente la luz provoca el aumento de la forma reducida de algunos coenzimas redox fotosintéticos (concretamente ferredoxina y NAD(P)H), así como de la forma energética del adenin-nucleótido y, en consecuencia, estimula la actividad de los enzimas afectados. Es decir, la luz controla, por medio de la fotorreducción y de la fotofosforilación, el estado redox y la carga energética celular, y, a través de ellos, el grado de actividad de los principales enzimas reguladores. El efecto final es lógico, pues es beneficioso para el metabolismo celular que los ciclos fotosintéticos operen en la luz, cuando hay abundancia de poder asimilatorio, y que se detengan en la oscuridad, cuando hay escasez de poder reductor y energía química de enlace.

En contraste con los ciclos de la reducción fotosintética del carbono, el ciclo oxidativo de las pentosas está sometido a regulación metabólica en sentido inverso, es decir, se inactiva en la luz, como respuesta al exceso de poder reductor del primer enzima de la ruta, o glucosa-6-fosfato deshidrogenasa, y se activa en la oscuridad, en su defecto. De esta manera está garantizado no sólo el bloqueo del ciclo de deshidrogenación de la glucosa en la luz (cuando su funcionamiento sería perjudicial), sino su operación en la oscuridad (cuando ha de suplir la función de la luz en el suministro de poder reductor).



CADENA DE TRANSPORTE DE 2 ELECTRONES del complejo enzimático NAD(P)H-nitrato reductasa de las algas eucarióticas y plantas superiores, que cataliza la reducción de nitrato a nitrito. En la transferencia de electrones del NAD(P)H al nitrato (NO_3^-) participan secuencialmente dos actividades enzimáticas, que pueden ensayarse independientemente utilizando aceptores o donadores de electrones intermediarios. La primera es una NAD(P)H deshidrogenasa, o diaforasa, dependiente de FAD, y la segunda la molibdo-proteína nitrato reductasa propiamente dicha o nitrato reductasa terminal. El citocromo b_{557} actúa como transportador de electrones entre ambas mitades. En las algas procarióticas falta la mitad inicial diaforásica, y la ferredoxina reducida directamente por la luz sirve, en vez del NAD(P)H, como donador de electrones.



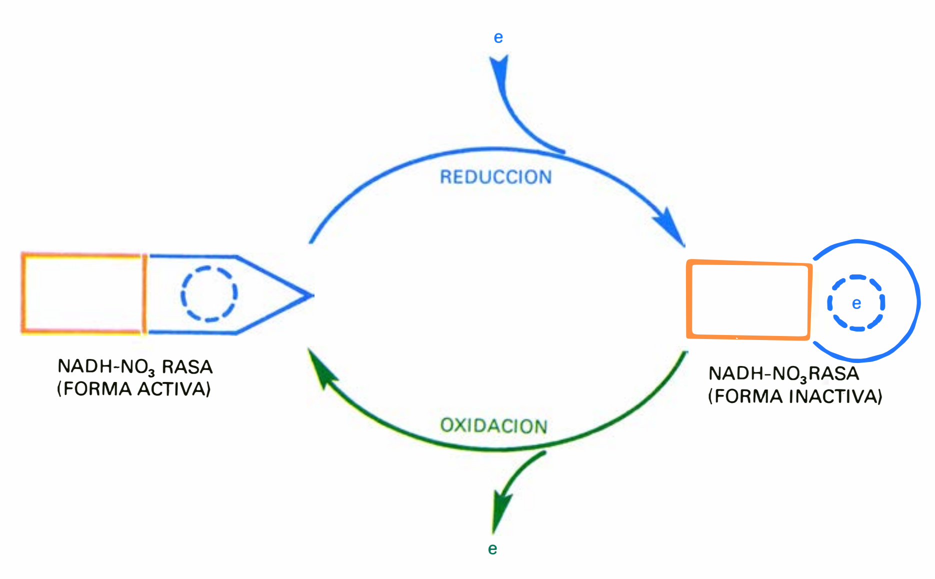
CADENA DE TRANSPORTE DE 6 ELECTRONES del enzima ferredoxina-nitrito reductasa de las algas procarióticas, eucarióticas y plantas superiores, que cataliza la reducción del nitrito a amoniaco. En la transferencia de electrones de la ferrodoxina reducida (Fd_{red}) al nitrito (NO_2^-) actúan secuencialmente un grupo sulfoférrico y un hemo específico, o sirohemo.

Hoy está firmemente establecido que –tanto en bacterias, como en plantas o animales– algunos enzimas claves del metabolismo pueden existir en dos formas interconvertibles, una activa y otra inactiva, como resultado de modificaciones químicas covalentes, tales como la fosforilación, adenililación, uridililación o adenosindifosfatoribosilación. Experimentos recientes en nuestro Departamento de Sevilla y en el Departamento de la Profesora Vennesland, de la Max-Planck Gesellschaft de Berlín, han puesto de manifiesto que la nitrato reductasa –el primer enzima del sistema reductor de nitrato– está también sujeto al fenómeno de la *interconversión metabólica* por modificación química, pero de un nuevo tipo. En efecto, este enzima puede existir en dos formas interconvertibles, una activa oxidada, que se inactiva por reducción, y otra inactiva reducida, que se reactiva por oxidación *(véase la ilustración inferior izquierda).*

De acuerdo con las pruebas actuales, la interconversión de la nitrato reductasa parece estar primariamente inducida por una fluctuación en el estado redox y la carga energética celular, en respuesta a un cambio de una serie de condiciones ambientales. Por ejemplo, la adición de amoniaco –el producto final de la reducción fotosintética del nitrato– a un cultivo de algas verdes, creciendo exponencialmente en la luz con nitrato como fuente de nitrógeno, promueve rápidamente la inactivación del enzima, o, mejor dicho, de su mitad terminal. El proceso es reversible, y la nitrato reductasa se reactiva de manera igualmente rápida cuando se quita el amoniaco del cultivo y se resuspenden las células en su medio original. Aparentemente, el amoniaco actúa como desacoplante de la fosforilación fotosintética provocando simultáneamente una subida del poder reductor y un descenso de la carga energética celular. De hecho, la inactivación reversible de la nitrato reductasa puede conseguirse rápidamente *in vitro* reduciendo el enzima con NADH en presencia de ADP. El nitrato y el pH bajo protegen contra la inactivación del enzima y favorecen su reactivación, y también el O_2 y el CO_2 desempeñan un papel importante, todavía no bien definido, en el proceso de interconversión. Por otro lado, el grupo de Vennesland ha puesto gran énfasis en la inactivación fisiológica de la nitrato reductasa por el cianuro.

El amoniaco desempeña también un papel fundamental en la absorción del nitrato, impidiendo su entrada en la célula, y regula no sólo la asimilación fotosintética del nitrógeno sino la del carbono. Como ha demostrado Bassham, de la Universidad de California, en Berkeley, en una serie de brillantes trabajos, la adición de amoniaco durante la fotosíntesis a un cultivo de *Chlorella* detiene casi completamente la síntesis de carbohidratos, a la par que estimula fuertemente la de aminoácidos y grasas. En resumen, los primeros pasos de la asimilación del nitrato (tanto por lo que concierne a su penetración en la célula como a su reducción a amoniaco) representan la puerta de entrada del nitrógeno inorgánico en el metabolismo y ejercen

EL SIROHEMO, o grupo prostético funcional de la nitrito reductasa (y de la sulfito reductasa) que combina y reduce el nitrito a amoniaco (y el sulfito a sulfuro). Su estructura corresponde a una ferrotetrahidroporfirina del tipo de la isobacrioclorina, con ocho cadenas laterales carboxílicas.



ESQUEMA DE LA INTERCONVERSION metabólica del complejo NADH-nitrato reductasa ($NADH$-NO_3Rasa) entre una forma activa (oxidada) y una forma inactiva (reducida). Sólo la segunda mitad del complejo, o nitrato reductasa terminal, dependiente de Mo, está sujeta al fenómeno de la inactivación reversible, al recibir o perder electrones (e) algún grupo específico todavía no identificado, en tanto que la primera mitad, o diaforasa, no experimenta modificación ostensible.

un papel preeminente de vasto alcance en la regulación de la fotosíntesis.

Sistemas bioquímicos de conversión de la energía solar

Por las razones apuntadas al principio de este artículo, durante los últimos años se ha despertado gran interés en la investigación de los sistemas fotosintéticos que pueden utilizar la fotolisis del agua para la producción de combustibles. A este respecto merece la pena dedicar unas líneas a comparar el sistema fotosintético de reducción del nitrato a amoniaco, especialmente estudiado en nuestro laboratorio, con otros sistemas fotosintéticos redox reales o posibles *(véase la ilustración de la derecha)*.

Puesto que todos los sistemas redox que vamos a considerar utilizan ferredoxina (el primer aceptor terminal de electrones del fotosistema I) como donador primario de electrones, bien directamente o a través de los nicotinamida-adenin-dinucleótidos, se puede calcular, teniendo en cuenta los respectivos potenciales redox y el requerimiento de 2 cuantos de luz por electrón, la energía que exige, en cada caso, la transferencia de electrones al par aceptor, así como el rendimiento de la reacción global.

El sistema más sencillo sería el que utilizase la *fotorreducción de protones a hidrógeno molecular,* lo que supone la transferencia de 2 electrones (4 cuantos) del par H_2O/O_2(E'_o, pH 7, +0,82 V) al par H_2/H^+ (E'_o, pH 7, –0,42 V), según la ecuación:

$$2H^+ + H_2O \longrightarrow H_2 + 1/2\ \ O_2 + 2H^+(\Delta F'_o,\ \text{pH } 7,\ 57\ \text{kcal})$$

La reacción requiere, pues, 4 einsteins de luz roja (168 kcal) por mol de hidrógeno producido, y ocurre con un rendimiento teórico del 34 por ciento, que, si se tiene en cuenta la fosforilación acoplada con el transporte de electrones, 1 ~ P/2e, asciende al 38 por ciento. El inconveniente de este atractivo sistema, que ya ha sido ensayado *in vitro* por varios grupos de investigadores, es que requiere la adición de enzimas auxiliares y la eliminación absoluta de oxígeno molecular, un producto de la reacción.

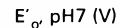
Otro sistema de enormes posibilidades sería el que realizase la *fotorreducción del nitrógeno molecular a amoniaco,* pero como el de fotoproducción de hidrógeno sólo funciona en estricta anaerobiosis, presentando, además, enormes requerimientos de ATP (15ATP/N_2). Aunque las algas verde-azuladas fijan fotosintéticamente N_2, parece que el proceso es complicado y requiere la cooperación de dos tipos de células: las vegetativas, que realizan una fotosíntesis normal, y los heterocistos, que reciben de ellas los fotosintatos y los utilizan como fuente de poder reductor para, con el concurso del ATP que ellas mismas fotosintetizan, llevar a cabo la fijación del N_2. El acoplamiento directo de la fotolisis del agua con la reducción del N_2 ofrece, pues, un interés fascinante, pero quizá también dificultades insalvables:

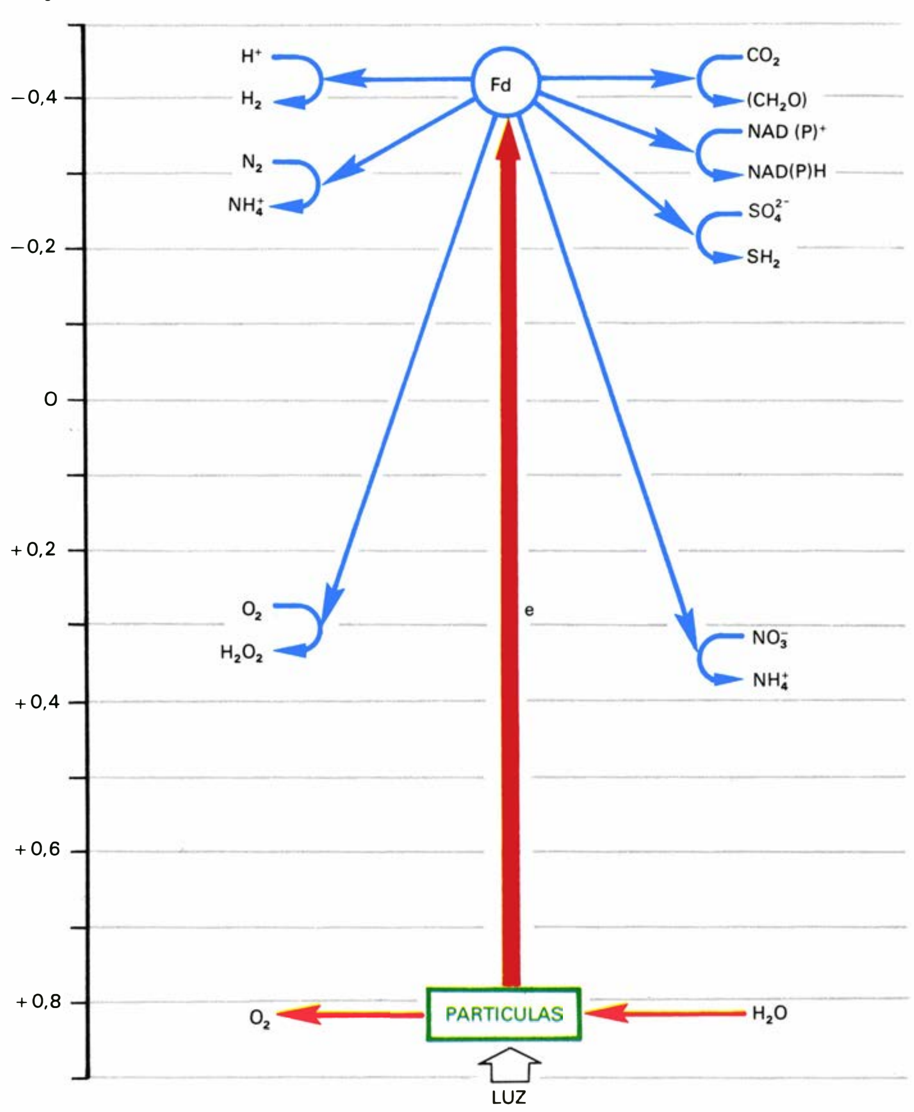
$$N_2 + 3\ H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} 2NH_3 + 3/2\ \ O_2$$

En cuanto hoy sabemos, el único sistema biológico de fotoconversión que funciona en condiciones aeróbicas y sin ninguna clase de aditamentos es el constituido por partículas de las algas verdeazuladas que permite la *fotorreducción del nitrato a amoniaco* con agua como reductor, de acuerdo con la ecuación global:

$$NO_3^- + 4H_2O + 2H^+ \longrightarrow NH_4^+ + 2\,O_2 + +3H_2O(\Delta F'_o,\ \text{pH7},\ 86\text{kcal})$$

Teniendo en cuenta que la transferencia de 8 electrones desde el agua al nitrato para la reducción completa de éste a amoniaco requiere 16 cuantos (672 kcal), el rendimiento del proceso resulta ser cercano al 13 por ciento, si no se considera la fosforilación acoplada, y del 18 por ciento si se toma en consideración la síntesis concomitante de 4~ P.





VARIOS SISTEMAS REDOX de bioconversión de la energía luminosa aparecen aquí esbozados. La luz absorbida por las partículas fotosintéticas impulsa primero los electrones (e) del agua (H_2O), que se fotooxida, desprendiendo oxígeno molecular (O_2), hasta el nivel de la ferredoxina (Fd). Ésta los cede entonces a una serie de aceptores, tales como H^+, O_2, N_2, NAD(P)$^+$, CO_2, NO_3^+, SO_4^{2-}, etc., que se transforman en sus correspondientes formas reducidas, H_2, H_2O_2, NH_4^+, NAD(P)H, (CH_2O), NH_4^+, SH_2, etc. Una fracción significativa de la energía transformada queda, pues, finalmente acumulada en los respectivos productos fotosintetizados.

El amoniaco, aparte de su extraordinario interés químico y bioquímico, es un excelente y poderoso combustible, y como tal se emplea en la propulsión de cohetes. Por el oxígeno se oxida, bien a nitrógeno molecular o a nitrato, de acuerdo con las siguientes reacciones simplificadas, muy exergónicas:

$$NH_3 + 3/4\, O_2 \longrightarrow 1/2\, N_2 + 3/2\, H_2O \quad (\Delta F'_o,\ pH7, -76\ kcal)$$

$$NH_3 + 2\, O_2 \longrightarrow NO_3H + H_2O \quad (\Delta F'_o,\ pH7, -86\ kcal)$$

Por otro lado, el amoniaco puede considerarse como una fuente transportable de hidrógeno, ya que en su forma líquida proporciona más hidrógeno del que pudiera comprimirse en el mismo volumen, según indica la reacción de descomposición, débilmente endergónica:

$$2\, NH_3 \longrightarrow N_2 + 3\, H_2 \quad (\Delta F'_o,\ pH\ 7, 19\ kcal)$$

Por ello puede utilizarse en sopletes oxhídricos para la soldadura de metales, acoplando su descomposición, según la reacción anterior, con la combustión del hidrógeno, fuertemente exergónica.

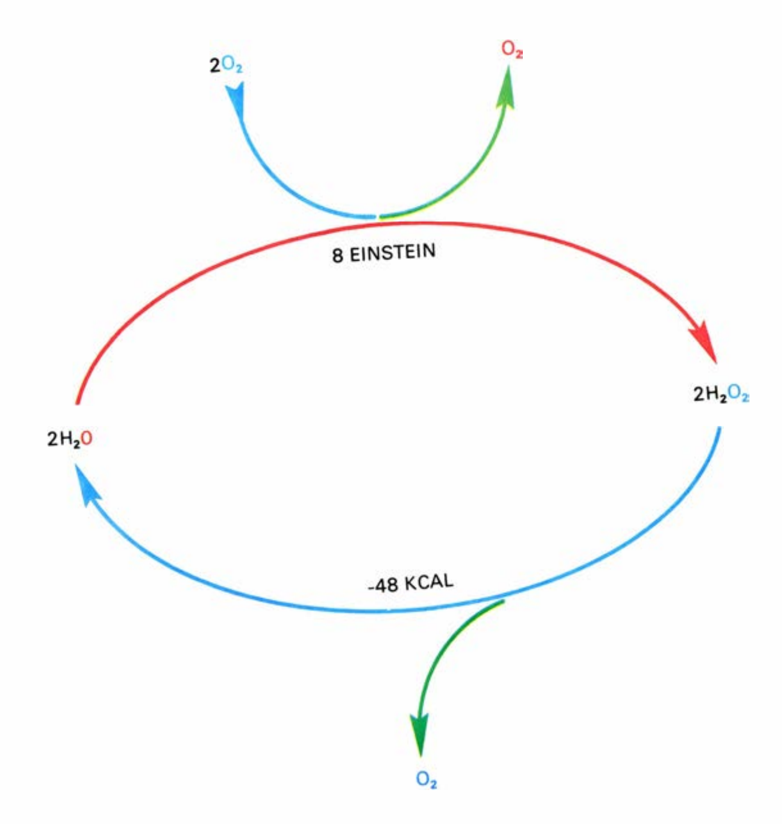
Para terminar vamos a referirnos a un sistema que puede ser el más idóneo por su simplicidad y requerimientos, a saber, el de *fotorreducción del oxígeno molecular a peróxido de hidrógeno.* Como es bien sabido, el aparato fotosintético de algas y plantas cataliza de hecho esta reacción, acoplándola con la fotolisis del agua:

$$O_2 + H_2O \longrightarrow H_2O_2 + 1/2\, O_2 \quad (\Delta F'_o,\ pH\ 7, 24\ kcal)$$

Teniendo en cuenta que la transferencia de 2 electrones desde el agua al oxígeno para reducirlo a peróxido de hidrógeno requiere 4 cuantos (168 kcal), el rendimiento de la reacción global es del 14 por ciento, si no se considera la fosforilación acoplada, y del 18 por ciento, si se tiene ésta en cuenta. El peróxido de hidrógeno, como el amoniaco, es un combustible de calidad. Al actuar simultáneamente como reductor y oxidante reacciona consigo mismo descomponiéndose en agua y oxígeno, según la siguiente reacción exergónica:

$$H_2O_2 + H_2O_2 \longrightarrow 2\, H_2O + O_2 \quad (\Delta F'_o,\ pH7, -48\ kcal)$$

De acuerdo con lo que antecede cabe imaginar un sistema fotosintético que realizase la conversión de la energía solar en agua oxigenada, y permitiese, a continuación, disponer de la energía que libera este combustible al descomponerse, cerrando un ciclo de extraordinaria sencillez y limpieza, que sólo implicaría la absorción y eliminación de oxígeno *(véase la ilustración inferior).*



ESQUEMA DE UN CICLO para la utilización de la energía luminosa. En él se pueden distinguir dos fases: 1) fotorreducción por el agua (H_2O) del oxígeno molecular (O_2) a peróxido de hidrógeno (H_2O_2), y 2) liberación espontánea, por autodescomposición, de la energía química almacenada en éste. La energía de la luz produce un autocombustible limpio de gran riqueza energética.

Misiles crucero

Esta nueva categoría de armas de gran precisión y bajo coste presenta un difícil problema a la mesa de negociaciones del control de armamentos, a saber: cómo distinguir con seguridad entre la versión táctica y la estratégica

Kosta Tsipis

Los éxitos parciales alcanzados por los negociadores de Estados Unidos y de la URSS en las conversaciones que se vienen llevando a cabo para limitar la carrera de armas nucleares estratégicas, se basan en el reconocimiento mutuo de que cada una de las partes dispone de "medios técnicos nacionales" (principalmente satélites de reconocimiento) para distinguir de manera firme entre armas estratégicas, o de alcance intercontinental, y el resto de las que componen el arsenal del otro lado. El misil crucero de largo alcance, nuevo tipo de arma que en la actualidad se halla en desarrollo en Estados Unidos, puede ser una excepción a esta regla. No existe diferencia alguna apreciable entre los misiles crucero de largo alcance (capaces de llevar a cabo misiones estratégicas) y los misiles crucero de corto alcance (los apropiados únicamente para misiones tácticas). En otras palabras: no existe una correlación clara y evidente entre la apariencia física de un misil crucero dado y el objetivo al que se destina.

De acuerdo con los informes aparecidos en la prensa diaria, el anunciado advenimiento del misil crucero de largo alcance ya ha originado un importante obstáculo para concluir satisfactoriamente la segunda ronda de conversaciones sobre la limitación de armas estratégicas (SALT II), entre Estados Unidos y la URSS. El problema inmediato es el de si los misiles crucero deben ser incluidos o no en el total de 2400 vehículos de lanzamiento estratégico, establecidos como límite máximo para ambas partes, en las conversaciones mantenidas en Vladivostok entre el Presidente Ford y el Secretario General Brezhnev. Las propiedades básicas de los misiles crucero, que ya han dado lugar al actual desacuerdo, amenazan con crear un impedimento similar en las futuras negociaciones sobre limitación de armas estratégicas.

En lo concerniente al control de armamentos, el dilema a que dan origen los misiles crucero viene determinado por lo siguiente: aunque el misil crucero parece ser operativamente inferior a las armas estratégicas existentes, ya sea en lo relativo a la disuasión o a la destrucción (contragolpe), en realidad es, en potencia, un arma táctica de gran eficacia en relación a su coste. Por ejemplo, los misiles crucero de corto alcance podrían reemplazar, con el tiempo y en muchas de sus misiones, a los caza-bombarderos tripulados, permitiendo una significativa disminución del número de las costosas instalaciones que dichos aviones requieren, tales como portaviones y bases situadas en países extranjeros.

En consecuencia, los Estados Unidos se oponen a la inclusión de los misiles crucero dentro de la cuota establecida para vehículos de lanzamiento estratégico –dada la imposibilidad de distinguir visualmente los diferentes tipos de misiles crucero–, debido a que semejante norma impediría el desarrollo de los misiles crucero tácticos, por considerárseles armas estratégicas. Por su parte, la URSS insiste en la inclusión, en la cuota de armas estratégicas, de todos los misiles crucero, potencialmente capaces de llevar a cabo misiones de largo alcance; la razón estriba en que no habría forma de determinar si un misil crucero estadounidense es un arma táctica o estratégica. Ello explica que las SALT II sigan paralizadas.

¿Qué es un misil crucero? ¿Cómo actúa? ¿Cuáles son sus posibilidades? ¿Por qué aquel que cubre una distancia de 5000 km no se puede distinguir del que únicamente recorre la décima parte de dicho camino?

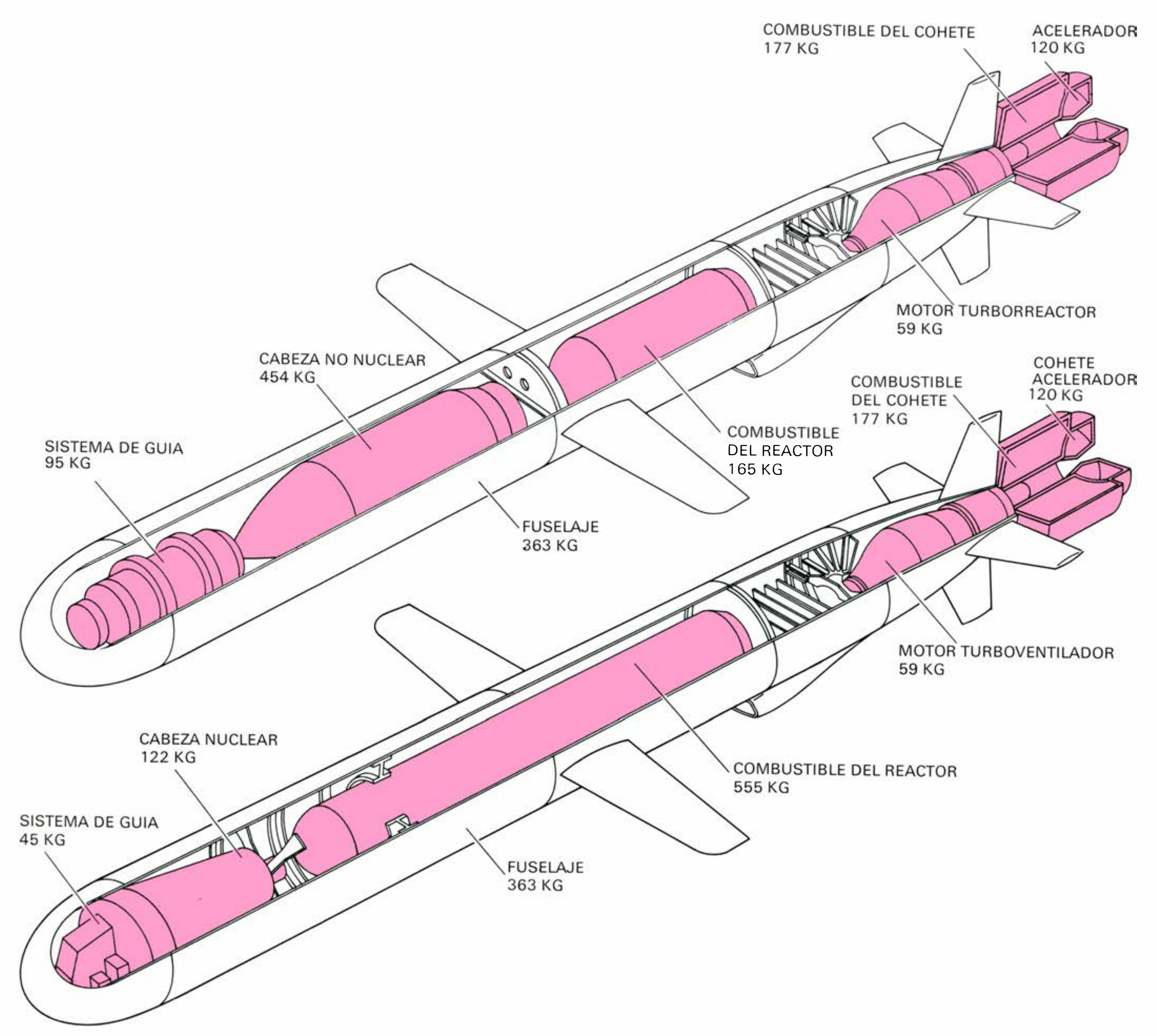
Trataré de dar respuesta a esos interrogantes, describiendo los distintos tipos de misiles crucero actualmente en proyecto o en fase de planificación, examinando las posibilidades tácticas y estratégicas de las diferentes versiones y analizando su utilidad militar potencial, así como sus efectos sobre los esfuerzos que se están llevando a cabo para establecer un control de armamentos. Consideraré, también, el difícil problema de relacionar la misión encomendada a un misil crucero con sus características observables, ofreciendo una sugerencia para el establecimiento de una posible base técnica mediante la cual pueda ser resuelto el problema.

Un misil crucero puede ser definido como un vehículo de lanzamiento de bombas autónomo, autoguiado, de propulsión continua y combustión por aire, que vuela como un avión y está dotado de superficies aerodinámicas. A diferencia de un misil balístico, el cual es propulsado y, por ello, generalmente guiado sólo durante una breve parte inicial de su vuelo, después de lo cual sigue una trayectoria de caída libre, gobernada únicamente por el campo gravitatorio local, un misil crucero necesita una guía constante, ya que la velocidad y la dirección de su vuelo pueden resultar alteradas de manera imprevisible, como consecuencia de las condiciones climatológicas locales, o por cambios en el funcionamiento del sistema de propulsión. Un misil balístico va guiado sólo durante los cinco primeros minutos de los veinte, aproximadamente, que tarda en recorrer 5000 km; un misil crucero, que, en general, vuela a velocidades subsónicas, requeriría unas seis horas de guía continua para cubrir la misma distancia. Por consiguiente, los errores de dirección que se acumularían, llegarían a ser casi cien veces mayores en un misil crucero que en un proyectil balístico, para una distancia equivalente. La desviación acumulada en una trayectoria de miles de kilóme-

tros resultaría ser, en el caso de un misil crucero, muy grande; por tanto, el que alcanzara con seguridad su objetivo se lograría únicamente mediante una guía, constante, corregida de vez en cuando a través de nuevas informaciones sobre su posición. Para obtener dichas informaciones, el misil crucero de largo alcance recurre a un ingenio que correlaciona la información relativa al terreno sobre el que vuela, obtenida por medio de un sensor situado a bordo, cotejándola con algún tipo de mapa almacenado en la memoria de un computador, también incorporado en el misil.

Los misiles crucero se utilizaron en el pasado como vehículos de lanzamiento de cabezas de guerra, empezando con las "bombas volantes" alemanas V-I, de la segunda Guerra Mundial, y continuando con armas tales como los misiles estadounidenses Matador, Regulus y Snark, y el misil ruso Shaddock, que aún se emplea a bordo de algunos submarinos y barcos rusos. Ninguna de esas primeras versiones estaba capacitada para obtener información posicional que permitiera corregir el sistema de dirección durante el vuelo; por ello, no eran muy precisas. Además, estaban propulsadas por motores a reacción ineficaces que, por lo general, no permitían alcanzar sino distancias de unos cuantos centenares de kilómetros.

La diferencia principal entre las anteriores versiones del misil crucero y las que actualmente se hallan en proyecto en Estados Unidos radica en que los adelantos tecnológicos recientes han puesto a disposición dos nuevos e importantes componentes: 1) ingenios microelectrónicos, que pueden proporcionar al momento información acerca de la situación en que se encuentra un misil crucero mientras se halla en vuelo, mejorando su precisión en tres órdenes de magnitud y 2) pequeños y eficaces motores a reacción, que, cada hora de vuelo, consumen un kilogramo de combustible por kilogramo de empuje que generan. Estos dos adelantos técnicos afectan primariamente el desempeño de los misiles cruceros estratégicos, ya que, a distancias tácticas, el tiempo de vuelo se mide en minutos; por lo tanto, incluso un sistema de dirección moderadamente preciso no



MISIL CRUCERO DE LANZAMIENTO DESDE EL MAR (SLCM) destinado a la Marina de los Estados Unidos, actualmente en proyecto. Estos esquemas indicativos muestran la versión táctica, o de corto alcance *(arriba)*, y la versión estratégica *(abajo)*. Sin el cohete acelerador, necesario para el lanzamiento desde un submarino, o desde un buque, ambos misiles tienen un diámetro de 53 centímetros y 6,24 metros de longitud. Se indican los pesos de los distintos componentes. Desde el punto de vista externo, las dos versiones parecen idénticas.

necesita corrección a mitad de vuelo. Por otra parte, un misil táctico puede ir equipado con un indicador automático de vuelo, radar por ejemplo, que detecte el blanco y dirija el misil hacia él.

El misil crucero de largo alcance posee un sistema de guía inercial, que consiste básicamente en tres o más acelerómetros, montados sobre plataformas estabilizadas mediante giróscopos, que lo orienta a lo largo de una trayectoria prefijada. Un sistema de guía inercial adecuado, adaptable a un misil crucero, permite que éste derive aproximadamente un kilómetro respecto de su curso por cada hora de vuelo. Los efectos climatológicos y las imperfecciones del motor a reacción que impulsa al misil ocasionan un aumento de la deriva. Transcurridas algunas horas de vuelo, el misil podría encontrarse a diez o más kilómetros de distancia de su objetivo. No obstante, si el misil pudiera "reconocer" de vez en cuando el lugar donde se halla, y cotejar su posición real con la posición en la que debería encontrarse, de acuerdo con la trayectoria prefijada, el computador de a bordo podría dar instrucciones al piloto automático, en el sentido de efectuar las maniobras oportunas para regresar a la trayectoria correcta. Por lo demás, el computador usa la diferencia conocida entre posición real y posición prevista para calibrar y reajustar el sistema de guía inercial, proceso que compensa y reduce la deriva del misil en un factor de dos a tres.

Existen distintos procedimientos mediante los cuales un misil crucero puede determinar su posición real durante el vuelo. Describiré brevemente tres de dichos sistemas, a saber, la técnica de cotejo del contorno del terreno (Tercom en la terminología militar), la técnica de correlación de superficies y la técnica de satélites en posición global.



EL PRIMER LANZAMIENTO submarino del nuevo SLCM, de la Marina de Estados Unidos, tuvo lugar el día 13 de febrero de 1976, en el Naval Undersea Center, de la isla de San Clemente, California. El misil fue lanzado desde un tubo lanzatorpedos sumergido, e impulsado hasta la superficie del agua mediante su cohete acelerador. Una vez fuera del agua, se desprendió automáticamente de su cubierta protectora, y desplegó sus planos de deriva de cola, elevándose hasta una altura de más de 300 metros, por efecto impulsor del cohete; en esta fase se desplegaron las alas y la trampilla de salida del motor reactor, y se soltó el cohete acelerador, ya gastado; el misil de prueba, sin motor, planeó a lo largo de una distancia de casi 4 kilómetros. En el modelo operativo, el motor reactor se haría cargo de la parte aerodinámica del vuelo. El SLCM está diseñado para su lanzamiento desde los tubos lanzatorpedos de un submarino, un buque, un avión o desde bases terrestres.

La técnica de cotejo del terreno, patentada en 1958, basa su principio funcional en el simple hecho de que la altura del terreno sobre el nivel del mar varía en función de la posición. Si se levantara un mapa rectangular de una superficie de dos kilómetros de ancho, por diez de largo, se dividiera después el mapa en cuadrículas de cien metros de largo, y se anotara en cada cuadrícula la altura media del terreno, se obtendría un mapa numérico, con dos mil dígitos, cada uno de los cuales correspondería. a la altura sobre el terreno de un punto de coordenadas conocidas. Un juego de tales mapas, que puede hacerse mucho mayor, y cuyas cuadrículas pueden tener lados tan pequeños como sea necesario, se almacena en la memoria del computador a bordo del misil.

El misil va provisto también de un altímetro radárico de enfoque hacia abajo, capaz de distinguir objetos menores que las cuadrículas de los mapas, desde una altura de varios kilómetros. Cuando el misil se aproxima a la región de la cual la memoria del computador tiene un mapa, el altímetro empieza a suministrar un flujo de datos referentes a la elevación del terreno. El computador, al cotejar estos datos con los datos de elevación del terreno que almacena en su memoria, puede determinar el emplazamiento real del misil, con una acuidad comparable al tamaño de la célula del mapa. Pasa, luego, instrucciones al piloto automático para que realice las correcciones necesarias a fin de devolver el misil a su trayectoria correcta. En la memoria del computador se pueden almacenar unos veinte mapas de éstos; ello le permite al misil poner al día su información de situación, así como corregir frecuentemente su trayectoria durante el vuelo.

El método de correlación de superficies, todavía en fase de estudio, está basado en un principio similar de levantamiento de planos. Sin embargo, en lugar de medir la elevación del terreno respecto al nivel del mar, mide su reflectividad de microondas en función de la localización. No está dotado de un altímetro radárico, sino de un detector que puede captar las diferencias en la reflectividad de microondas del terreno sobre el que vuela. En los modernos esquemas de correlación de superficies se prevén unos misiles dotados de un sistema a bordo que incorpore mapas del terreno, realizados sobre una parte del espectro electromagnético, y de detectores que funcionen con diferentes longitudes de onda. Por ejemplo, dicho sistema podrá comparar señales procedentes de un radiómetro de microondas o de un detector de infrarrojos con los datos de un mapa realizado sobre la parte visible del espectro. Esta comparación es posible debido a que la existencia de accidentes del terreno, como lagos, ríos, carreteras, vías de ferrocarril y otras construcciones creadas por la mano del hombre dan lugar a pronunciados "bordes de contraste" en una gran zona del espectro. La técnica de correlación de superficies puede ser aplicada para la localización del misil en cualquier clase de terreno, mientras que la técnica de cotejo del terreno con el mapa se desenvuelve bien únicamente en terrenos montañosos o escabrosos. Ninguno de ambos sistemas funciona sobre el agua.

El tercer sistema para situar la posición de un misil crucero es el de satélites en posición global; dicho sistema se halla también en proyecto en Estados Unidos. El plan consta de 24 satélites situados en posiciones polares, de suerte que cualquier punto de la superficie de la tierra estará vigilado, en todo momento, por cuatro satélites de éstos. A intervalos de milésimas de segundo, los satélites irán emitiendo señales codificadas, sincronizadas exactamente, que podrán ser captadas por el equipo situado a bordo del misil crucero. Midiendo la diferencia de los tiempos de llegada entre cuatro de dichas señales, el computador del misil podrá calcular la distancia que medie de éste a los satélites. Además, los satélites irán emitiendo información sobre sus órbitas alrededor de la tierra. Con esta información, y los cuatro tiempos diferentes de llegada de las señales, el computador podrá determinar la posıción real del misil con un error de unos diez metros, sin necesidad de nuevos datos. A partir de esta información podrá, además, deducir su velocidad en cualquier momento.

De las tres técnicas que acabo de reseñar, sólo el sistema de satélites en posición global promete ser lo bastante económico como para poder usarlo cuando se trate de misiles crucero de corto alcance. Debido a su breve tiempo de vuelo, tales misiles no necesitan información actualizada de posición. En lugar de ello deben reconocer su objetivo y encaminarse a él. Tratándose de blancos móviles se prefiere, si es posible, la "puntería" mediante radar, pero en el caso de blancos fijos, situados más allá del ángulo de visión, puede usarse el sistema de satélites en posición global, para dirigir el satélite hacia la situación conocida del blanco.

Los adelantos registrados en la tecnología de pequeños motores a reacción han sido igualmente importantes para el desarrollo de los misiles crucero, tanto estratégicos como tácticos. En la actualidad, se dispone de pequeños motores turboventiladores, que pesan menos de 60 kilogramos, capaces de generar un impulso hasta de 272 kilogramos. Los motores de este tipo consumen menos combustible que los turborreactores de tamaño equivalente; sin embargo, son sistemas más complejos, por lo que su coste es mucho mayor. De aquí que los motores turboventiladores sean considerados apropiados para misiles crucero de un alcance superior a los 500 kilómetros, que pueden transportar cargas de alto precio, tales como bombas nucleares, en tanto que el coste de los turborreactores se considera para misiles crucero de menos de 500 kilómetros, que lleven explosivos convencionales de gran potencia.

La diferencia en la eficacia de los dos tipos de motores a reacción se relaciona en parte con la diferencia en la temperatura de los gases de escape que produce cada tipo. Aunque la temperatura de entrada en la turbina, en los motores pequeños de ambos tipos, alcanza aproximadamente los 1010 grados centígrados, un motor turborreactor expele sus gases a una temperatura de 788 grados C, mientras que un motor turboventilador, debido a la mezcla turbulenta a la salida de la turbina, lo hace a 316 grados. Obviamente, este último utiliza de forma más eficaz la energía térmica de su combustible. La diferencia entre las temperaturas de los dos tipos de motor ofrece, por lo tanto, distinta "firma" de infrarrojos. Así pues, en principio, debería ser posible determinar, a una cierta distancia, si un misil, sometido a control, va impulsado por un motor turboventilador o por un motor turborreactor.

El nivel de adelantos en el campo de la microelectrónica ha sido espectacular, pero el desarrollo de pequeños motores a reacción es laborioso. Se tarda muchos años en poner a punto un nuevo motor o en mejorar la eficiencia de otro ya existente en unas pocas unidades porcentuales. Por lo tanto, es razonable suponer que los sistemas de propulsión de los misiles crucero no cambiarán sustancialmente a lo largo de la próxima década, o plazo de tiempo semejante. Cabe esperar pequeñas mejoras en las eficiencias, y, por ende, en el alcance para una cantidad fija de combustible, a medida que se vayan utilizando nuevos materiales compuestos en las paletas de la turbina. Sin embargo, el nivel de

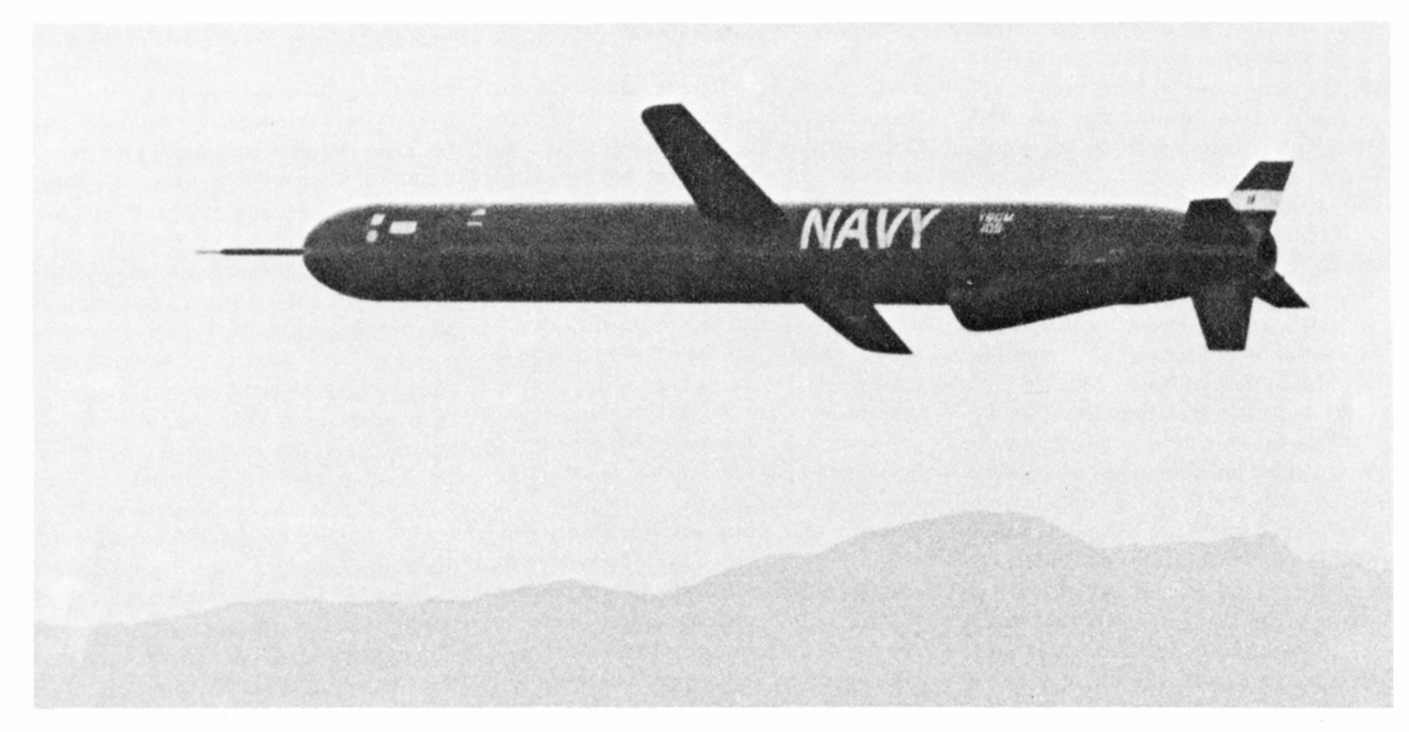
consumo de combustible y de empuje en los pequeños motores no será objeto de avance tecnológico sensacional. Se puede concluir que el perfil aerodinámico del misil crucero no experimentara grandes cambios en un futuro más o menos inmediato.

Los avances tecnológicos que he mencionado ya han sido aplicados a la creación de ciertos tipos de misil crucero en Estados Unidos. Me ocuparé de dos de ellos: el misil anti-barcos Harpoon, que ahora se empieza a producir en serie, y que es, estrictamente, un misil crucero táctico, y el misil crucero para lanzamiento desde el mar (SLCM), que se encuentra todavía en período de proyecto, y del que existen dos versiones, la táctica y la estratégica. Se han elegido estos dos tipos porque, en conjunto, ilustran las ventajas y desventajas específicas de los misiles crucero.

El misil Harpoon es bastante pequeño, ya que mide 34 centímetros de diámetro y 3,84 metros de longitud. Su volumen total ocupa 0,3 metros cúbicos. Desprovisto del cohete acelerador, pesa 523 kilogramos. Puede ser lanzado contra un barco desde un submarino, desde otro barco de superficie, o un avión. También es posible fabricar una versión para su lanzamiento desde bases terrestres. El Harpoon va impulsado por un motor turborreactor, con un empuje de 299 kilogramos y un nivel de consumo de combustible de unos 0,7 kilogramos de combustible, por kilogramo de empuje y por hora de vuelo. Esto le otorga un alcance máximo de aproximadamente 100 kilómetros, a una velocidad de 0,85 mach (85 por ciento de la velocidad del sonido). Como se supone que el motor ha de funcionar únicamente durante un corto período de tiempo, está constituido por muchas piezas de fundición, en lugar de piezas mecanizadas. De aquí que tan sólo opere satisfactoriamente durante un breve lapso, si bien a un coste significativamente menor que el de un motor turboventilador pequeño, destinado a funcionar muchas horas.

El sistema de dirección del misil Harpoon está constituido por un altímetro radárico, que lo mantiene volando a pocos metros sobre la superficie del mar; una unidad de dirección de curso medio, que lo mantiene en un rumbo fijo y un complicado radar explorador activo, que puede detectar un blanco del tamaño de una lancha patrullera, en todas las condiciones climatológicas, aproximadamente a la mitad de su máximo alcance, o un blanco del tamaño de un destructor, a distancias mucho mayores. El misil puede distinguir entre dos blancos, si están suficientemente separados, y orientarse hacia el mayor de ellos. Va dotado de una cabeza nuclear de 227 kilogramos, que penetra en la cubierta del buque objetivo, haciendo explosión en su interior mediante una espoleta de desaceleración. En 32 lanzamientos efectuados desde diversas plataformas marítimas y aéreas, el Harpoon ha alcanzado, en 29 ocasiones, su blanco a distancias operacionales.

Las dos versiones, táctica y estratégica, del misil crucero para lanzamiento desde el mar, tienen 53 centímetros de diámetro, 6,24 metros de longitud, y un volumen de 1,37 metros cúbicos, cuando está desprovisto de su cohete acelerador. Sin la cubierta protectora, en cuyo interior son transportados y lanzados, tienen un peso aproximado de 1478 kilogramos. Las dos versiones pueden ser disparadas desde los tubos lanzatorpedos de un submarino, desde un barco, desde un avión o desde plataformas terrestres. Las distancias exactas que alcanzan las dos versiones son secretas, pero las propiedades aerodinámicas de los mismos indican que la versión estratégica puede alcanzar una distancia de unos 2000 kilómetros volando a baja altura, y quizá un 50 por ciento más si recorre los primeros 1500 kilómetros a gran altura y el resto al nivel del arbolado de un bosque. La versión estratégica va impulsada por un motor turboventilador, con un empuje de 272 kilogramos y un promedio de consumo de combustible a nivel del mar de un kilogramo de combustible por kilogramo de empuje y por hora de vuelo, aproximadamente. A nivel del mar, el misil posee una velocidad de crucero de 0,7 mach y una velocidad máxima de 0,85 mach. Cabría lograr un consumo proporcional de combustible mucho menor a mayores alturas, con un empuje neto más pequeño.

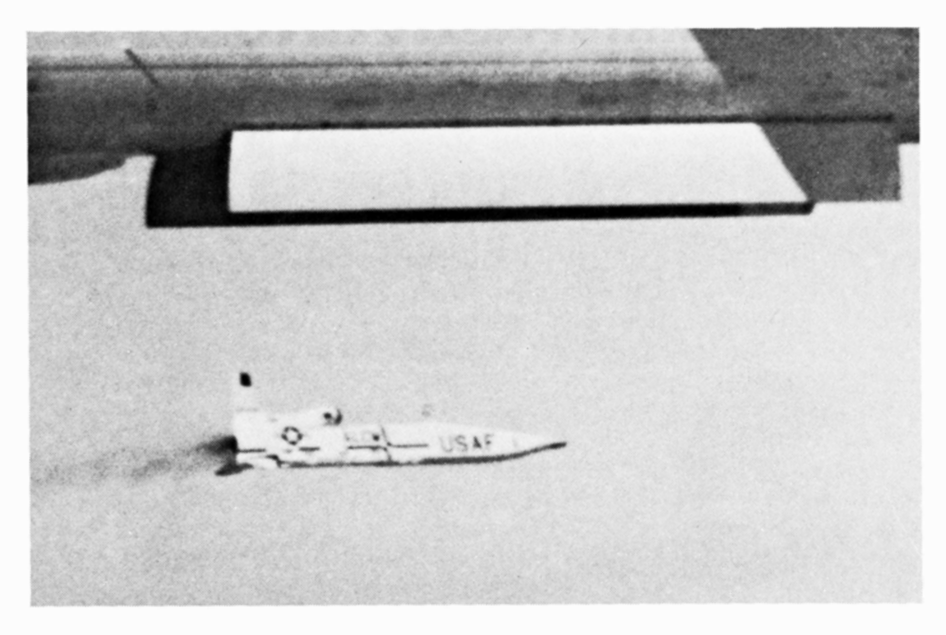


VUELO SOBRE TIERRA de un SLCM, fotografiado durante el transcurso de una prueba reciente para comprobar su capacidad de maniobra. Este modelo va equipado con un motor turborreactor y un sistema de guía de adaptación a la orografía del terreno.

Puesto que el misil no puede volar a velocidades inferiores a 0,44 mach, se utiliza un cohete acelerador, que pone en funcionamiento el dispositivo de lanzamiento e impulsa al misil durante doce segundos. A una altura de 400 metros (suponiendo un ángulo de ascenso de 55 grados), y a una velocidad de 0,55 mach, se pone en marcha el motor turboventilador. No es necesario el cohete acelerador para el caso de lanzamiento de misiles crucero desde un avión.

El conjunto del sistema de dirección del misil crucero de lanzamiento desde el mar consta de un sistema de guía inercial, con una deriva intrínseca de unos 900 metros por hora de vuelo, y un sistema de adaptación a la orografía del terreno. El altímetro radárico del sistema de adaptación al terreno permite que el misil vuele a una altura de 20 metros sobre el agua, a 50 metros sobre un terreno formado por colinas no muy altas y a 100 metros por encima de terreno montañoso. Resulta, pues, difícil detectarlo mediante radares situados en tierra. Los giróscopos de la plataforma de guía inercial necesitan 25 minutos para alinearse, después de haber sido cargado el misil dentro del tubo lanzatorpedos de un submarino, tarea que, a su vez, tarda cinco minutos. Por lo tanto, en el mejor de los casos, el SLCM estratégico puede ser lanzado desde un submarino, en salvas de dos a cuatro (depende del número de tubos lanzatorpedos), una vez cada 30 minutos. El encendido del cohete acelerador bajo el agua genera gran cantidad de energía acústica, que puede detectarse a grandes distancias. Además, el cohete acelerador origina muchas burbujas, que son visibles sobre la superficie del agua durante más de cinco minutos después del lanzamiento; por añadidura, la estela del tubo de escape del acelerador resulta visible en una zona de 80 kilómetros de radio conforme el misil asciende hasta los 400 metros. En consecuencia, la posición del submarino puede determinarse por distintos medios después de que haya lanzado bajo el agua uno o más de sus misiles.

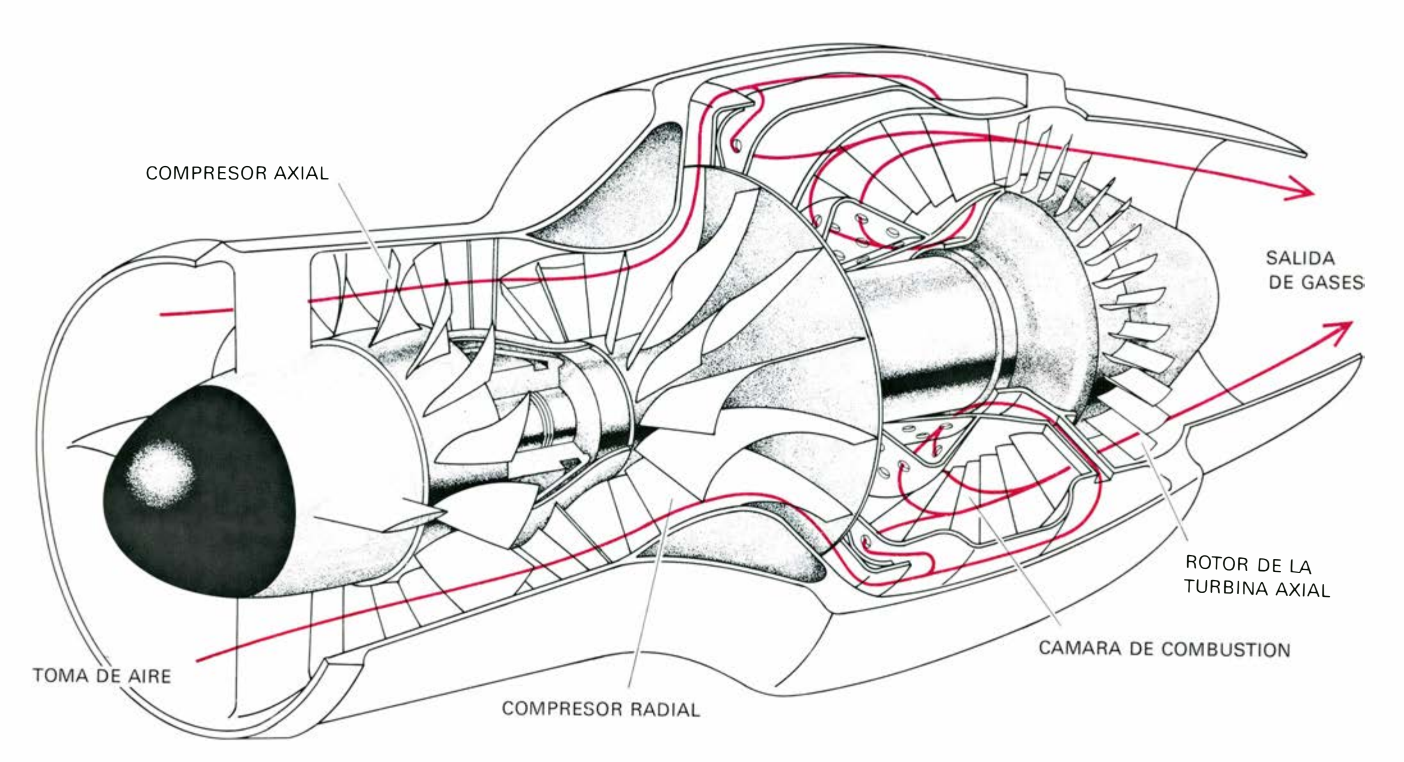
El sistema de cotejo del terreno del misil crucero estratégico de lanzamiento desde el agua está provisto de una docena o más de mapas, sobre los cuales el terreno ha sido registrado en dígitos a intervalos de menos de 100 metros; por su parte, las alturas quedan registradas con un error de menos de 3 metros. Como se supone que el misil ha de volar inicialmente sobre el agua, donde la actualización del emplazamiento es imposible, el primer mapa terrestre se traza con la suficiente amplitud (de una anchura tal vez hasta de 10 kilómetros) como para que el misil no se equivoque de objetivo. El altímetro radárico empieza a efectuar lecturas antes de que el misil vuele sobre una determinada zona del mapa y cesa de hacerlo a una distancia igual, después de haber abandonado dicha zona. El computador utiliza un sencillo algoritmo de desviación absoluta mínima, para cotejar la lectura del altímetro con los puntos del mapa. Hay una redundancia tan grande en los datos del altímetro, que ni los errores de sincronización, ni siquiera los intentos de sabotearlo desde tierra, afectarían al funcionamiento del sistema.



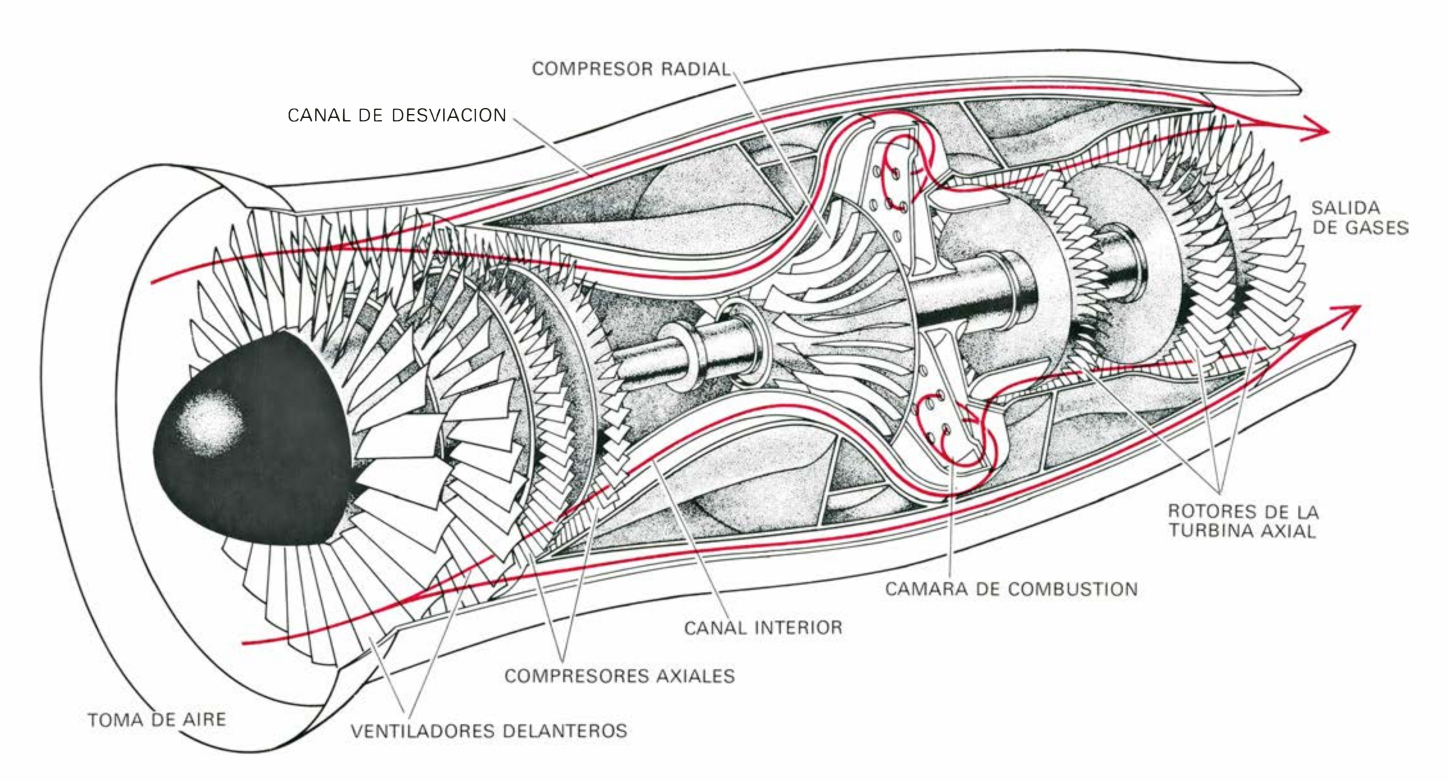
EL PRIMER VUELO PROPULSADO del nuevo misil crucero de lanzamiento desde el aire (ALCM) tuvo lugar el día 5 de marzo de 1976, en el White Sands Missile Range. Este misil, cuyo proyecto corre a cargo de la Boeing Aerospace Company, fue lanzado desde el compartimento de armas de un bombardero B-52, a una altura de 3000 metros. La parte propulsada del vuelo dura unos 11 minutos. En esta fotografía, la toma de aire del motor está abierta, el motor funcionando, los elevones (alerones traseros) están completamente extendidos y el plano de cola vertical se halla desplegando; los alerones delanteros mayores no tardarán en desplegarse.

La precisión con que puede guiarse al misil crucero hasta su objetivo es igual, en el mejor de los casos, al tamaño de una cuadrícula del mapa; en la práctica, la exactitud es, probablemente, la mitad. Como las cuadrículas pueden ser muy pequeñas, de diez metros de lado, por ejemplo, en principio es posible lograr una precisión parecida para el misil. No obstante, un cierto número de factores contribuyen a la degradación de este nivel de exactitud, por lo que se prevé que el misil crucero estratégico de lanzamiento desde el mar pueda errar su objetivo en unos 100 metros, aproximadamente. Se supone que los errores máximos se deberán a fallos humanos en la confección de mapas, desde una elección poco sensata del terreno por cartografiar, hasta la falta de un terreno apropiado para el sistema de cotejo en las cercanías de algún objetivo.

La versión táctica del misil crucero de lanzamiento desde el mar está impulsada por un motor turborreactor que le proporciona un alcance de unos 500 kilómetros. Va guiado por un sistema muy parecido al del misil Harpoon, consistente en una unidad de guía de curso medio, que mantiene al misil en vuelo sobre una línea recta, pero que no lleva a cabo reajustes de vuelo cuando el viento desvía al misil de su rumbo. Además, el misil lleva un radar de exploración, con un alcance comparativamente corto, probablemente de no más de 50 kilómetros, cuya misión estriba en guiarlo hacia el blanco. La unidad guía de curso medio tiene una deriva de dos radianes por hora de vuelo, aproximadamente. De aquí que pueda producirse errores hasta de 40 kilómetros en un vuelo de 500 kilómetros. El misil, cuando está volando, necesita alguna fuente de información externa sobre la posición exacta de su objetivo. La línea visual sobre el agua no se extiende más allá de 50 kilómetros, de modo que la información necesaria no puede ser proporcionada por la plataforma de lanzamiento; ha de ser obtenida por otro vehículo, que puede ser un helicóptero o un avión explorador, el cual debe estar equipado de manera apropiada para identificar el blanco y comunicar la información a la plataforma de lanzamiento o al misil crucero. Cuando la plataforma de lanza-



PEQUEÑO MOTOR TURBORREACTOR desarrollado por Teledyne, Inc., para ser utilizado por el Harpoon, misil crucero contra barcos, de la Marina de los Estados Unidos. El motor desechable, destinado a funcionar menos de 15 minutos, incorpora un gran número de piezas de fundición, no muy caras; su coste se eleva a unos 15.000 dólares. El aire entra por el conducto y pasa a través de un compresor axial y un compresor radial, antes de penetrar en la cámara de combustión anular, donde se mezcla con el combustible, y en donde dicha mezcla se enciende. Antes de su expulsión los gases pasan luego, a alta temperatura, a través de una turbina rotor. La turbina rotor acciona los compresores por medio de un eje de rotación a lo largo del eje del motor. El empuje se produce, únicamente, por la corriente de salida de los productos de combustión de alta temperatura. El peso del motor ronda los 46 kilogramos y puede generar un empuje de unos 300 kgs.



PEQUEÑO MOTOR TURBOVENTILADOR, Un motor turboventilador es, por definición, más eficaz que un motor turborreactor de igual tamaño; resulta también más complejo y lleva un mayor número de piezas elaboradas, por lo que su coste es considerablemente más alto. En el motor turboventilador, las turbinas accionan los compresores del recorrido de circulación del generador de gases y un sistema de ventiladores, el cual obliga a que el aire comprimido pase a través de un canal de desviación. El turboventilador, entonces, induce una fuerza a lo largo de dos corrientes separadas: la corriente del ventilador y la corriente del generador de gases. La proporción entre las dos corrientes se denomina proporción de desviación del motor. El diseño que se muestra en este diagrama se describe como un turboventilador de doble manguito, con baja proporción de desviación del motor y una mezcla de gases de salida. El manguito de baja presión consta de un sistema ventilador axial de dos fases, auxiliado por dos rotores de compresión axial en el recorrido de circulación del generador de gases, accionado todo ello por dos turbinas axiales. El manguito de alta presión consta de un compresor centrífugo simple, que está accionado por una turbina axial.

miento es un submarino, la misión táctica del misil crucero lanzado desde el mar resulta todavía más difícil; su lanzamiento no solamente revelará la posición del submarino, sino que, además, los problemas de captación del blanco y de la identificación "amigo/enemigo" se hacen sumamente complejos. El alcance del sonar del submarino dista mucho de llegar a los 500 kilómetros, y mientras la nave está sumergida, no puede comunicarse ni con el misil crucero ni con la plataforma de observación, que podría ser un avión. La mala adaptación del misil crucero a la capacidad de alcance de identificación del blanco por parte del submarino convierte la versión táctica del misil crucero de lanzamiento desde el mar en un arma de dudoso valor.

La tecnología de los misiles crucero ofrece tal flexibilidad en alcance, bases de lanzamiento y tipos de cabeza de explosión, que permite una variedad casi ilimitada de diseños. Al estudiar las características militares y sus influencias en las conversaciones sobre control de armamentos, he elegido tres tipos de misil, atendiendo a las cuestiones normativas, particularmente espinosas, que suscitan. El primero de ellos es un misil crucero estratégico de largo alcance y gran precisión, dotado de una cabeza de poderoso explosivo convencional; el segundo, que aún se halla en proyecto, es un misil crucero estratégico aerotransportado, dotado de una cabeza nuclear; el tercero es un misil táctico de corto alcance, con base de lanzamiento terrestre o marítima, dotado de una cabeza convencional.

Existen pocas dudas respecto a que las técnicas de dirección existentes o en fase de desarrollo puedan proporcionarle al misil crucero estratégico una precisión total al final de un vuelo de cinco mil kilómetros. Este alto grado de precisión hace posible la utilización de cabezas convencionales, en lugar de nucleares, contra cierto tipo de objetivos, tales como grandes instalaciones de radar, plantas industriales, refinerías de petróleo y otras. Se ha propuesto que los Estados Unidos produzcan un misil crucero que pueda transportar una gran cabeza convencional de alto poder explosivo, a distancias intercontinentales, con un error no mayor de 10 metros. Este arma tendría aproximadamente un volumen de dos metros cúbicos (algo mayor que el misil crucero normal de lanzamiento desde el mar) y sería transportado por barco o por avión de carga; también podría ser lanzado desde una base terrestre. Si se fabricara un número bastante grande de ellos, afirman los que propugnan su creación, ello permitiría contar con la posibilidad de una respuesta no nuclear, frente a alguna acción, hipotétidamente coercitiva, del adversario (Rusia, por ejemplo). Esto podría elevar el umbral de represalia nuclear, capacitando a Estados Unidos para destruir objetivos específicos, con un daño colateral mínimo y sin las onerosas cargas políticas de un ataque nuclear.

El segundo tipo de misil crucero, cuyo desarrollo se está tomando seriamente en consideración en Estados Unidos, es el misil crucero lanzado desde el aire (ALCM). Se espera que la versión normal de este misil tenga un alcance aproximadamente igual a la mitad del que tiene el misil estratégico lanzado desde el mar. Está proyectado para ser transportado por el bombardero intercontinental B-52, o por el nuevo bombardero supersónico B-1. Armados con tales misiles, los bombarderos no tendrían que penetrar en las defensas aéreas terminales del adversario; simplemente, podrían llegar hasta un lugar determinado y lanzar desde allí los misiles de largo alcance contra sus objetivos. Los defensores del misil crucero de lanzamiento desde el aire afirman que, desde un lugar determinado "alejado de las líneas enemigas", el avión transportador no habría de cruzar las defensas aéreas del adversario, por lo que no sería necesario que desarrollara una velocidad supersónica, ni sistemas complicados de contramedidas, ni estar capacitado para volar muy bajo y muy rápido, con el fin de eludir su descubrimiento y evitar su caza. En otras palabras, no habría de ser, en absoluto, un avión de combate. De hecho, se argumenta, cabría la posibilidad de que un reactor de transporte de gran capacidad, verbigracia, el Boeing 747, o el McDonnell Douglas DC-10, pudiera transportar aproximadamente 100 misiles crucero de éstos. Los aviones comerciales de este tipo tienen una mayor autonomía de vuelo sin repostar que el B-52 o el B-1. Si se les armara con misiles crucero de lanzamiento desde el aire, podrían reemplazar al bombardero B-52, con un coste menor que el del propuesto B-1.

La tercera posible versión del misil crucero sería un misil táctico, con un alcance máximo de 500 kilómetros y una cabeza de alto poder explosivo, cuyo peso variaría entre 181 y 227 kilogramos. Según sus patrocinadores, este misil podría ser guiado exactamente contra su objetivo con la ayuda del sistema de satélites en posición global o mediante cualquier técnica de reconocimiento normal; podría incluso ir provisto de un sistema para devolver, por medio de un avión o un satélite retransmisor, un croquis televisivo del terreno sobre el que vuela, a medida que se acerca a su objetivo, pudiendo de esta manera ser dirigido a distancia por un operador humano.

Semejante misil de pequeño tamaño (de un volumen de menos de medio metro cúbico) podría ir equipado con un motor turborreactor no muy caro, y podría ser programado para evitar las defensas aéreas, volar a una altura constante y funcionar bajo cualquier condición atmosférica. Sus propugnadores mantienen que podría reemplazar en muchas de sus misiones al caza-bombardero tripulado. Si se construyera en grandes cantidades, el coste por misil podría ser de unos cincuenta mil dólares. Por el contrario, el avión táctico tripulado suele costar más de diez millones de dólares, y requiere una gran fuerza operativa de portaaviones para ser transportado hasta un punto situado dentro del alcance de su radio de acción. Una fuerza operativa normal puede desplegar tan sólo treinta y seis aviones de combate, capaz cada uno de ellos de lanzar una tonelada de bombas por misión, con menos precisión que la que se conseguiría utilizando misiles crucero. La totalidad de la fuerza operativa, cuyo coste es de muchos miles de millones de dólares, podría ser reemplazada por una fuerza naval, capaz de lanzar ciento ochenta misiles cruceros tácticos por día, compuesta por una variedad de barcos menos vulnerables y más baratos que los portaaviones. Por último, los defensores de esta versión del misil crucero puntualizan que éste podría reemplazar a la totalidad de las armas nucleares tácticas estadounidenses que se hallan instaladas en Europa.

En combinación con misiles dirigidos de corto alcance y gran precisión, con base en tierra, y vehículos pilotados a distancia, que lleven a cabo las misiones de observación del avión tripulado, el misil crucero táctico, armado con una cabeza de guerra de explosivo químico, puede desplazar por completo a los cazabombarderos tripulados, así como a su grande y costosa "cola" logística del arsenal de Estados Unidos.

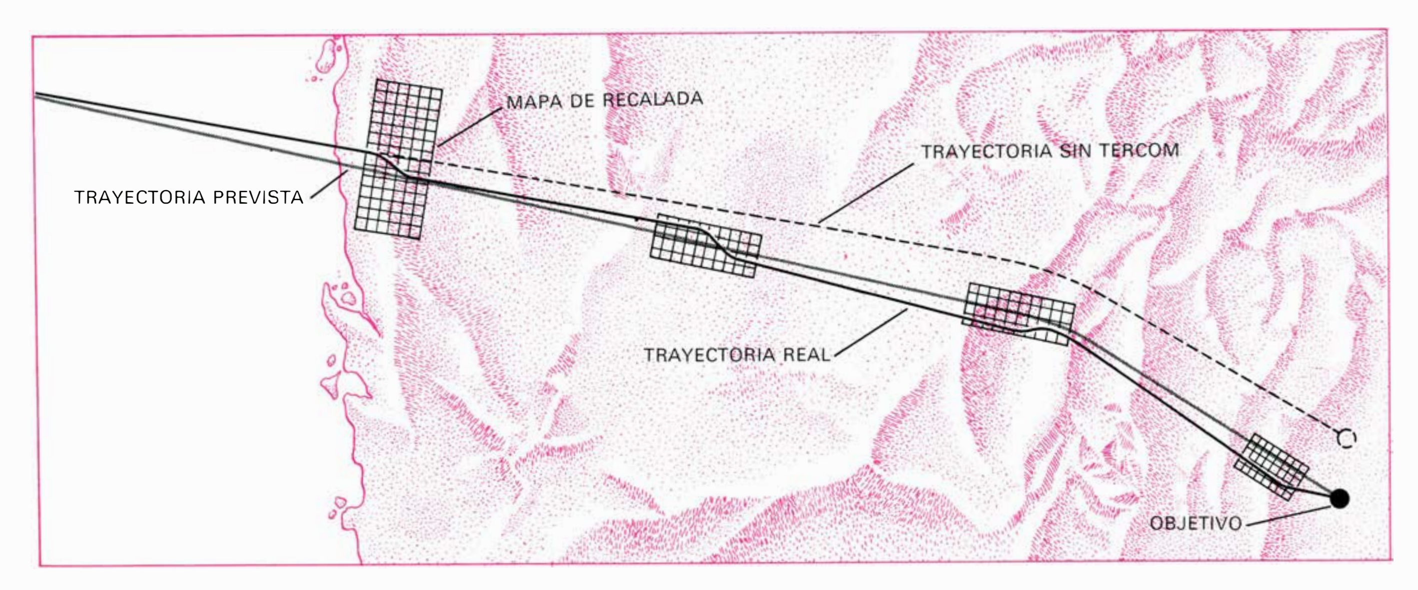
Un programa de este tipo significaría un cambio profundo en la totalidad de la postura militar estadounidense, ya que representaría el abandono del avión tripulado, de alto coste y poco desgaste, para reemplazarlo por el misil

crucero de bajo coste y fácilmente renovable. Semejante perspectiva suscita una serie de cuestiones técnicas, militares y de control de armamentos que no han sido examinadas hasta ahora.

Debido al pequeño tamaño, gran precisión y bajo coste de los misiles crucero, podría parecer que son necesariamente superiores a los misiles balísticos, como vehículos de lanzamiento, para distancias superiores a los 10 kilómetros e inferiores a los 5000 kilómetros. Sin embargo, la gran duración del vuelo de los misiles crucero estratégicos y la velocidad subsónica con que se aproximan a sus objetivos los hacen muy vulnerables a las contramedidas que pueda tomar el enemigo. Por el contrario, si no hay un sistema de misiles antibalísticos, ningún misil balístico puede ser interceptado antes de alcanzar su objetivo, una vez que se ha lanzado. Si bien el resultado de un ataque estratégico con misiles balísticos es relativamente certero y controlado, un ataque efectuado con misiles crucero resulta incierto, pues su éxito depende en gran manera de la defensa aérea del país atacado. Aunque la precisión y el alcance de los misiles crucero sugieren que podrían desempeñar con éxito un papel de disuasión, su velocidad relativamente baja los hace menos apropiados que los misiles balísticos para esta misión estratégica en particular. Al objeto de estar seguros de que los misiles crucero llegarían hasta sus objetivos, habría que emplear gran número de ellos contra cada objetivo, con el fin de saturar las defensas aéreas. Esto requeriría un enorme despliegue de misiles de este tipo, lo que constituiría una evidente violación de la cuota numérica establecida para vehículos de lanzamiento estratégico en el acuerdo de Vladivostok. Sin embargo, con independencia del número de misiles crucero instalados en un país, resultaría imposible comprobar su número a través de una inspección no directa, ya que estos misiles no requieren instalaciones de lanzamiento, tales como silos, tubos de lanzamiento submarino o aeropuertos. En consecuencia, resulta técnicamente imposible ajustar los misiles crucero al tipo de limitación numérica, establecida en las SALT II, para los misiles balísticos. La totalidad del problema de limitación de misiles crucero se complica aún más, debido al hecho de que incluso durante la comprobación del arma tan sólo sería posible deducir, de los datos obtenidos del satélite, el alcance máximo compatible con las características visibles del misil, pero no su alcance real. Por lo tanto, en la actualidad resulta imposible determinar si un misil crucero lanzado desde el mar tiene una misión estratégica o táctica.

Todas estas consideraciones podrían llevar a la conclusión de que Estados Unidos no tiene otra alternativa que, o bien cesar en todo esfuerzo ulterior por controlar la proliferación de armas nucleares, y seguir adelante con el despliegue de misiles crucero, o, con el fin de atenerse a los acuerdos logrados en las SALT, y la oportunidad de una posterior limitación de armas estratégicas, renunciar al despliegue del misil crucero en su conjunto. No obstante, semejante conclusión no parece justificada. Un examen cuidadoso de las misiones tácticas y estratégicas que los misiles crucero, actuales y futuros, podrían desarrollar, así como la necesidad de contar con plataformas de lanzamiento en cada caso, revela que las aplicaciones de este vehículo de lanzamiento, que tengan sentido en términos militares, no son incompatibles con los objetivos de limitación de armamentos, en general, y con la disminución en el número de vehículos de lanzamiento estratégico en particular. Por lo demás, parece que los misiles crucero específicos que amenazan a las negociaciones SALT son innecesarios para la seguridad de Estados Unidos o son aplicaciones arriesgadas y apresuradas de nuevas tecnologías que carecen de posibilidades militares.

Examinemos el misil crucero estratégico, de lanzamiento desde el mar, actualmente en una fase avanzada de desarrollo. Este sistema no puede llevar a cabo ninguna nueva misión, ni efectuar con mejor rendimiento ninguna de las misiones estratégicas desplegadas por la "terna" de Estados Unidos, formada por misiles balísticos intercontinentales de lanzamiento desde bases terrestres (ICBM), misiles balísticos de lanzamiento submarino (SLBM) y bombarderos



EL SISTEMA DE ADAPTACION AL CONTORNO del terreno, denominado abreviadamente Tercom, es una técnica de guía terminal, cuyo desarrollo va a la par que el programa de misiles crucero. El sistema se basa en la confección de mapas digitales, que quedan almacenados en la memoria del computador instalado a bordo del misil. Los mapas constan de series rectangulares de cuadrículas numeradas, que representan las alturas del terreno sobre el nivel del mar, en función de la localización. Cuando el misil se aproxima a una zona, de la cual lleva un mapa el computador, el altímetro radárico situado a bordo empieza a proporcionar una serie de datos relativos a las alturas del terreno. El computador, comparando estos datos con la información que almacena en su memoria, puede determinar exactamente la trayectoria

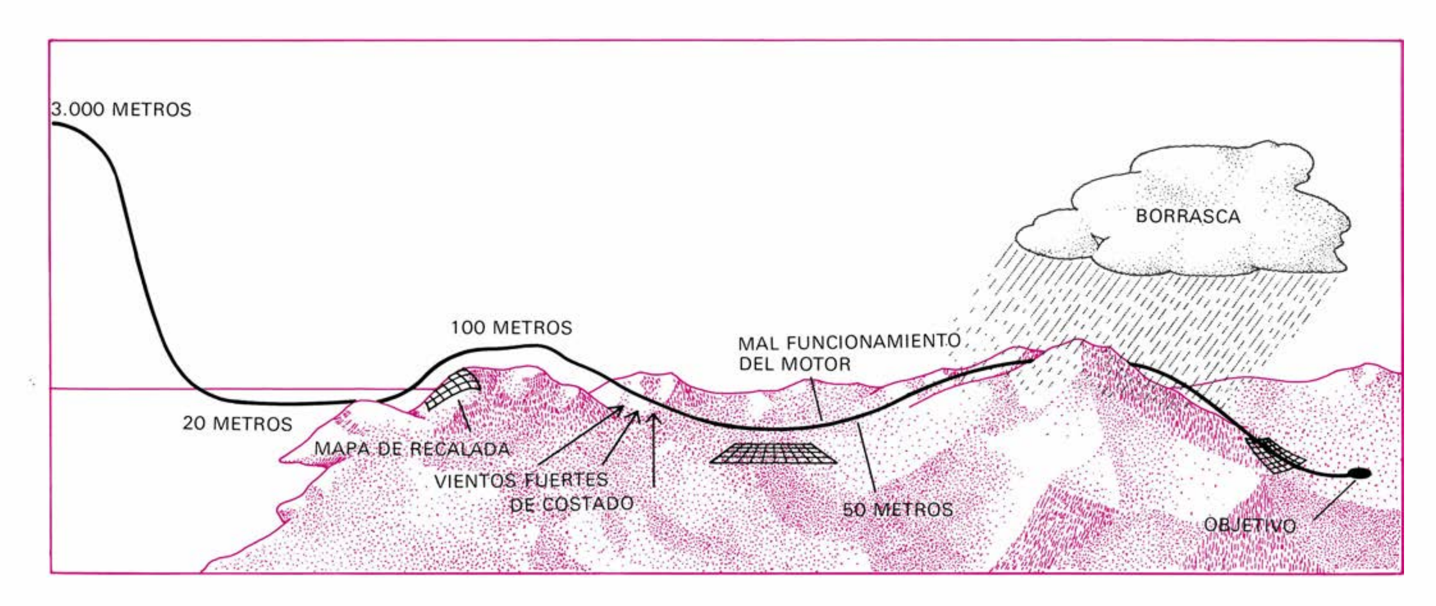
intercontinentales. Por otra parte, el lanzamiento de un misil crucero de este tipo desde submarinos para misiles balísticos incrementaría su vulnerabilidad, debido, en primer lugar, a que los submarinos habrían de abandonar sus actuales bases seguras y aproximarse a aguas territoriales de la URSS, y, en segundo lugar, porque el lanzamiento de un misil crucero revelaría la posición del submarino a una distancia de cientos de kilómetros. Sería temerario reducir la invulnerabilidad del sistema de armamento de disuasión más seguro que, de esta forma, podría lanzar, cuando más, cuatro misiles crucero de suerte incierta, cada treinta minutos, mientras que el mismo submarino puede permanecer en aguas seguras y lanzar 16 misiles Poseidón o Trident I, con 10 cabezas de explosión cada uno, en menos de cinco minutos, originando mucho menos ruido bajo el agua.

El despliegue de un número limitado de misiles crucero de largo alcance, a bordo de submarinos anti-submarinos, puede parecer una medida militarmente eficaz en cuanto a su coste, ya que forzaría a un eventual adversario a considerar a cada submarino nuclear de los Estados Unidos como un sistema de lanzamiento nuclear estratégico, haciendo necesario un incremento en la capacidad de guerra anti-submarina del enemigo. Sin embargo, tal política no está exenta de inconvenientes. El primero de ellos es que, al imponer un papel estratégico a los submarinos anti-submarinos, sus sistemas de control y mando se complicarían muy seriamente, con lo cual empeorarían sus posibilidades operativas. En segundo lugar, lo que quizá es más significativo, el despliegue de misiles nucleares estratégicos a bordo de submarinos anti-submarinos podría disminuir el índice de seguridad de la flota estadounidense de disuasión, integrada por submarinos dotados con misiles Polaris y Poseidón, no sólo suscitando un rápido crecimiento de la capacidad de guerra antisubmarina soviética, sino eliminando también la distinción entre submarinos tácticos y estratégicos y, como consecuencia inmediata, poniendo fin a la actual política de inhibición de ataques contra submarinos estratégicos. En pocas palabras, el desarrollo de misiles crucero estratégicos se presenta a un tiempo como innecesario e imprudente.

El hipotético misil crucero estratégico, dotado de una cabeza de explosivo químico, adolece de un conjunto de desventajas fundamentales. En principio, este misil podría ampliar las posibilidades de opciones estratégicas de que disponen los Estados Unidos, ya que permitiría la destrucción segura de objetivos seleccionados, militares o industriales, sin necesidad de recurrir al empleo de explosivos nucleares. Sin embargo, es de suponer que tales objetivos estarían en la URSS protegidos por defensas aéreas pasivas o activas, de tal manera que un misil crucero subsónico no podría penetrar en ellas fácilmente; además, a esta defensa se añadiría la vulnerabilidad de los misiles crucero, lo que tendría como resultado que un ataque con ellos resultaría muy inseguro. Evidentemente, las armas de resultados no muy seguros son ineficaces desde el punto de vista de la disuasión, incluso contra las más pequeñas provocaciones, al no poseer la capacidad de destruir con plena certeza los objetivos previstos. Así como la existencia de un sistema antibalístico eficaz podría haber acabado con el papel disuasorio de los misiles balísticos, un futuro sistema muy avanzado de defensa aérea despojaría de igual papel a los misiles crucero, en particular a los dotados de cabezas de guerra con explosivo químico.

Un misil crucero, dotado de una cabeza de guerra de explosivo químico haría aún más confusa la distinción entre armas estratégicas, de las cuales se supone actualmente que son nucleares, y armas tácticas, que no suelen ser nucleares. Esta circunstancia haría muy difíciles las negociaciones sobre limitación de armas estratégicas, al sumarlas a los empeños por disminuir los armamentos tácticos y al hacer confusa la distinción entre explosivos químicos y nucleares.

El misil crucero de largo alcance y de lanzamiento desde el aire podría tener en principio una aplicación militar práctica. La versión de este arma, hoy en desarrollo, se halla condicionada por limitaciones artificiales respecto a tamaño y combustible, las cuales disminuyen



real del misil, y dar instrucciones al piloto automático para que sitúe al misil en la trayectoria correcta. En la ilustración de la izquierda se muestra cuatro de estas maniobras correctoras. A la derecha se representa una perspectiva del vuelo terminal del misil. Para lograr una economía del combustible durante la primera fase del vuelo, éste habría de efectuarse a gran altura. En la fase de penetración del vuelo a baja altura, el misil podría volar a una altura no más alta de veinte metros sobre el nivel del mar, 50 metros sobre un terreno de colinas suaves y 100 metros sobre montañas, lo que hace difícil la localización del misil por medio de radares situados en tierra. Entre los factores que pueden dar lugar a que el misil se desvíe de su trayectoria se cuentan los cambios inesperados en las condiciones climatológicas.

mucho su alcance, fijándolo en aproximadamente la mitad del alcance del misil crucero de lanzamiento desde el mar, y haciéndola inapropiada como arma de apoyo. No obstante, una futura versión, capaz de efectuar recorridos más largos, y transportada mediante grandes aviones de carga, podría reemplazar al bombardero B-52 en la década de los años noventa, haciendo innecesario el desarrollo del costoso bombardero B-1. El despliegue de un misil crucero de este tipo originaría dificultades en relación con los problemas de control de armamentos, ya que no sería posible conocer con seguridad el número de misiles de que se dispone. Una solución viable sería llegar a un acuerdo respecto al número de portaaviones que pudieran transportarlos y contabilizar cada avión relacionándolo con un número convenido de misiles balísticos equipados con vehículos de reentrada, capaces de lograr blancos múltiples independientes (MIRV). Si todos los misiles balísticos provistos del dispositivo MIRV con base en tierra fueran reemplazados por un número equivalente de aviones de carga que llevaran misiles crucero de lanzamiento desde el aire, el resultado final podría ser un equilibrio estratégico más estable entre Estados Unidos y la URSS, por dos razones. La primera de ellas es que el largo tiempo de vuelo de los misiles crucero, y su vulnerabilidad frente a las defensas, excluyen su utilización como armas de ataque principal, y, la segunda, que si su emplazamiento se proyecta de manera apropiada, podría hacerlos mucho menos vulnerables que lo son ahora a un ataque por sorpresa.

A pesar del efecto estabilizador que semejante proposición implica, el desarrollo de misiles crucero de lanzamiento aéreo y de gran alcance da lugar a algunos problemas muy graves de comprobación. Por ejemplo, si los misiles crucero fueran instalados a bordo de reactores Jumbo como el 747 o el DC-10, ¿cómo podría determinarse, sin una inspección directa, cuál de estos aviones es de transporte civil y cuál lleva misiles crucero estratégicos, dotados de cabezas nucleares? Por otra parte, una vez que se permita el desarrollo y las pruebas de dichos misiles, ¿cómo podría otra nación estar segura del número de misiles fabricados en Estados Unidos, o del modo en que vaya a efectuarse su desarrollo?

Por ejemplo, la URSS podría albergar el temor de que Estados Unidos, además del número permitido de misiles crucero de lanzamiento desde el aire, desarrollara secretamente otros muchos misiles crucero auxiliados por cohetes secundarios, para lanzarlos desde el mar o desde tierra en países aliados, cuya situación geográfica les permitiera alcanzar con facilidad las zonas interiores de Rusia. En consecuencia, no parece posible llevar a cabo un despliegue de misiles crucero de largo alcance sin que se tambaleen los futuros empeños de limitación de armas estratégicas.

Existen otros factores que se oponen a semejante despliegue, y ello aunque se pudiera negociar con éxito una fórmula para la comprobación del número de plataformas destinadas a misiles crucero de lanzamiento desde el aire y de las bases dedicadas a tales misiles. Si las experiencias anteriores pueden considerarse como una guía para la conducta futura, resulta casi evidente que un despliegue de misiles crucero estratégicos por parte de Estados Unidos obligaría a Rusia a llevar a cabo un contradespliegue. Y, lo que es aún peor, el desarrollo por parte de Estados Unidos de dicha arma, revalorizaría el papel del misil crucero a los ojos de otras naciones, que desean poseer un vehículo de lanzamiento seguro y barato, y que podrían decidirse a desarrollar un misil parecido, capaz de alcanzar a Estados Unidos. En consecuencia, este país se vería obligado entonces a establecer un sistema de defensa aérea muy costoso, no solamente contra los misiles crucero rusos, sino también contra los misiles crucero de otros países. Semejante sistema no ha sido necesario hasta el momento, ya que no existía una amenaza real por parte de la URSS, o de cualquier otro país. No debería olvidarse que el despliegue de un sistema de antimisiles balísticos en Estados Unidos se justificó sobre parecidos razonamientos: es decir, como defensa contra misiles balísticos chinos, más que rusos.

A diferencia de los estratégicos, los misiles crucero tácticos ofrecen considerables ventajas militares, sin plantear graves problemas a la mesa de negociaciones sobre el control de armamentos.

Como lo ha demostrado el misil Harpoon, se puede desarrollar un misil crucero de pequeño tamaño, impulsado por un motor turborreactor de bajo coste y que posea el alcance y precisión necesarios para su empleo en situaciones prácticas en el campo de batalla. En cambio, el misil crucero táctico de lanzamiento desde el mar resulta inapropiado para las condiciones operativas de una batalla naval, amén de muy inseguro; por añadidura, su espectacular lanzamiento afecta negativamente a la seguridad del submarino desde el que se lanza, ya que pone al descubierto su posición. El SLCM táctico es el ejemplo perfecto de un mal uso de la tecnología del misil crucero: ocasiona graves problemas en el terreno del control armamentista ya que no se le puede distinguir del SLCM estratégico por su apariencia externa, y no incorpora ninguna ventaja militar sustantiva.

El misil crucero táctico propuesto, dotado de una cabeza de explosivo químico, es quizá la aplicación más sensata de los nuevos adelantos tecnológicos que han hecho factibles los misiles crucero. Con un volumen de medio metro cúbico y provisto de un motor turborreactor, puede ser identificado, mediante satélites, como un misil táctico. Aunque dicha identificación no sea tal vez posible utilizando los sistemas normales, excepto sobre el agua, se cuenta en la actualidad con la tecnología adecuada para desarrollar un satélite de reconocimiento, que podría ser programado para detectar, seguir la pista e identificar señales de infrarrojos en la atmósfera; de este modo se podría diferenciar un misil crucero estratégico de un misil crucero táctico, durante las pruebas.

El funcionamiento de tal sistema de vigilancia podría ser anulado por capas de nubes; por lo tanto, no podría verificar con certeza que otro país cumpliera lealmente las cláusulas de un tratado que prohibiera el desarrollo de misiles crucero de larga distancia. Sin embargo, como ningún país tendría razones para ocultar una actividad semejante aprovechándose de las capas de nubes, resultaría posible desarrollar y distribuir las armas tácticas que pudieran reemplazar a los cazabombarderos tripulados, sin temor a que fuesen confundidos por Rusia con misiles de largo alcance y, por lo tanto, sin poner en peligro los esfuerzos por limitar las armas nucleares estratégicas.

Dos conclusiones principales pueden extraerse del análisis precedente de las características de la función y la tecnología de los misiles crucero existentes, así como de los que puedan desarrollarse más adelante. La primera es que, con una sola posible excepción, el desarrollo y despliegue de misiles crucero estratégicos, en estos momentos, es contraproducente por tres razones: son innecesarios; su despliegue haría fracasar los acuerdos existentes sobre limitación de armas estratégicas y obstruiría los empeños similares futuros; su instalación en submarinos nucleares incrementaría la vulnerabilidad de éstos y, probablemente, disminuiría la eficiencia operativa de tan importante fuerza de

disuasión. La única posible excepción sería una versión futura de un misil crucero, que pudiera ser colocado en aviones de transporte, en lugar de bombarderos de largo alcance. No obstante, el precio de tal sistema no debe valorarse únicamente en dólares sino también en función de la pérdida de oportunidades de alcanzar un control de armamentos, de la aparición de nuevas amenazas contra este país y de la renuncia a establecer tope para las armas estratégicas.

La segunda conclusión es que los criterios negociables, para establecer una diferencia entre versiones estratégicas y tácticas de los misiles crucero, pueden, y deberían, estudiarse e incorporarse en el proyecto de los futuros misiles crucero. Los criterios de limitación deben fundarse en variables físicas observables, tales como el volumen de un misil crucero, o el tipo de motor con el que va equipado, en lugar de sobre variables no verificables, tales como el alcance del misil o el tipo de cabeza explosiva que transporta. Por ejemplo, se puede distinguir entre misiles crucero estratégicos y tácticos, definiendo como táctico cualquier misil que (1) tenga un volumen de menos de medio metro cúbico, (2) vaya impulsado por un motor turborreactor y (3) tenga un empuje inferior a los 272 kilogramos. Por el contrario, un misil estratégico sería aquel cuyo volumen excediera el medio metro cúbico y fuese impulsado por un motor turboventilador.

Las características físicas expuestas anteriormente pueden ser detectadas desde satélites de reconocimiento orbital, y no imponen (al menos en lo que respecta a Estados Unidos) ninguna restricción práctica en lo que se refiere al diseño de los misiles crucero, ya que, en cada caso, las variables físicas observables se elegirían para que encajaran en los criterios de limitación propuesto por razones tácticas y económicas. Los satélites de reconocimiento pueden proporcionar a Estados Unidos información acerca de que quizá está ocurriendo algo en la URSS, pero no pueden asegurar que algo no está ocurriendo. En consecuencia, aunque Estados Unidos pueda confiar en dichos sistemas de vigilancia, en lo relativo a obtener pronta información sobre el avance de los misiles crucero en la URSS, tales sistemas no pueden llevar a cabo una comprobación exacta que permitiera al senado de Estados Unidos ratificar, con pleno conocimiento, un tratado con la URSS, en que se prohibiese el desarrollo de misiles crucero estratégicos. Tales sistemas de control sí permitirían a Estados Unidos adoptar restricciones unilaterales en el desarrollo y despliegue de misiles crucero de largo alcance, al mismo tiempo que podrían invitar a la URSS a que concordara en una restricción similar. Estados Unidos puede tener la certeza de que con los sistemas de vigilancia dotados de las capacidades mencionadas puede detectar un eventual desarrollo de misiles crucero de largo alcance desde los comienzos, dándole oportunidad de cesar su restricción unilateral, con tiempo suficiente si así lo decide.

Se puede asumir una posición de restricción unilateral por dos razones. En primer lugar, no sería necesario reaccionar urgentemente, en caso de que se descubriera que la URSS estuviera fabricando misiles crucero de largo alcance, ya que, de acuerdo con los cálculos oficiales, Estados Unidos le lleva al menos diez años de adelanto a la URSS en lo que se refiere a las tecnologías significativas para el desarrollo de los misiles crucero. En segundo lugar, es evidente que la estabilidad del equilibrio estratégico entre los dos países, teniendo en cuenta los muchos miles de cabezas nucleares preparadas para ser lanzadas, a disposición de ambos, no puede alterarse, a menos que uno de los dos disponga de muchos miles de misiles crucero de largo alcance, armados con cabezas nucleares. Por lo demás, un despliegue semejante necesitaría para consumarse varios años, y sería detectado muy pronto por los satélites de vigilancia del enemigo. Una política de restricción unilateral, en el desarrollo y despliegue de misiles crucero de largo alcance por parte de Estados Unidos, no sólo resultaría segura y deseable desde el punto de vista de la economía, sino que permitiría además el desarrollo de un misil crucero táctico eficaz.

Dicha política obligaría a establecer una serie de estipulaciones respecto a la capacidad de reconocimiento de ambas partes. Para el éxito de los esfuerzos actuales y venideros en pro de la limitación de armas estratégicas, es indispensable mirar hacia el futuro y definir qué posibilidades de reconocimiento serán necesarias para controlar estas armas. La nueva tecnología que ha hecho posible el misil crucero puede usarse también para crear sistemas de vigilancia dotados de la capacidad necesaria para garantizar el cumplimiento de las condiciones establecidas, a partir de los criterios aquí expuestos. Lo que ha faltado hasta ahora es una dirección política con la voluntad y la capacidad de explotar la tecnología para controlar las armas nucleares, más que para su proliferación.

Fobos y Deimos

Esas minúsculas lunas del planeta Marte han sido vistas muy de cerca por los vehículos espaciales Mariner y Viking. Nos dan la primera visión de la naturaleza de los cuerpos menores del sistema solar

Joseph Veverka

Las fotografías enviadas desde Marte por el *Mariner 7* en 1969, por el *Mariner 9* en 1971-72 y por los dos vehículos espaciales *Viking* a partir del último verano, han revolucionado nuestro conocimiento del planeta y han enriquecido nuestra comprensión del sistema solar en general. Entre las fotografías más reveladoras se contaban las que mostraban, no al propio Marte, sino a sus dos lunas, Fobos y Deimos. Esos cuerpos diminutos han tenido un encanto especial ya desde que Johannes Kepler los inventó, casi tres siglos antes de que nadie supiera que existían. Kepler creía firmemente que el universo era un intrincado rompecabezas que incluía ciertas simetrías, introducidas por el Creador para impulsar al hombre a aguzar su ingenio en el estudio de las mismas. Respecto a las lunas de Marte, Kepler razonaba del siguiente modo: la Tierra tiene una sola luna; Júpiter tiene cuatro. Se desconocía por entonces la existencia de los nueve satélites jovianos restantes ¿Cuántas lunas debería tener el planeta que está entre la Tierra y Júpiter? La sucesión de duplicaciones 1, 2, 4... atrajo evidentemente el fino sentido de Kepler para la regularidad matemática, y, por lo tanto, asignó dos lunas a Marte. Es dudoso que, en ausencia de toda prueba de observación, alguien le creyera realmente, pero la idea fue lo bastante conocida para que tanto Swift como Voltaire se hicieran eco de ella, un siglo más tarde.

A finales del siglo XVIII, Sir William Herschel descubrió dos nuevas lunas de Saturno con su telescopio reflector de 48 pulgadas, pero no pudo detectar ningún satélite alrededor de Marte. Heinrich Ludwig d'Arrest, que contribuyó al descubrimiento de Neptuno, en 1846, fracasó también en la búsqueda de las lunas marcianas. Sólo en 1877, Asaph Hall, que trabajaba en el U.S. Naval Observatory, logró observar dos débiles manchas móviles de luz en las proximidades del planeta rojo. Las llamó Fobos (temor) y Deimos (terror), como los dos hijos de Ares (Marte en el panteón romano), quienes, en la mitología griega, conducen el carro del dios de la guerra.

¿Por qué el exito de Hall allí donde otros habían fracasado? En parte se debió a que estuvo observando durante una oposición muy favorable, cuando la distancia entre la Tierra y Marte es mínima. Y, en parte, a que el refractor de 26 pulgadas del U.S. Naval Observatory era uno de los mejores telescopios del mundo en aquella época. Sin embargo, casi todo el mérito debe atribuirse a la habilidad y a la perseverancia de Hall como observador. Fobos y Deimos son objetos notoriamente difíciles de detectar desde la Tierra. No sólo son tenues, sino que, además, nunca están muy lejos de Marte; se necesita mucha habilidad para atraparlos entre el torrente de luz difusa que rodea la imagen telescópica del planeta.

Se estableció muy pronto que Fobos y Deimos se movían en órbitas casi perfectamente circulares, sobre un plano que coincidía prácticamente con el del ecuador de Marte. El movimiento de ambos satélites es directo, es decir, giran alrededor de Marte en el sentido de la rotación de éste, que sería el opuesto al de las agujas del reloj para un observador imaginario situado en el polo norte del planeta.

La órbita de Fobos, la luna más interior, cae justo fuera del límite de Roche para Marte, a saber, la distancia crítica dentro de la cual la disrupción por efecto de marea impediría a cualquier enjambre de residuos interplanetarios acumularse en un solo cuerpo. La órbita de Deimos cae fuera de lo que se conoce como la posición de órbita estacionaria: el punto para el cual el período de revolución de un satélite es exactamente igual que el de rotación del planeta, de modo que, visto desde la superficie de este último, el satélite parece pender inmóvil del cielo.

El período orbital de Fobos, 7,7 horas, es mucho más breve que el de rotación de Marte, el cual es parecido al terrestre, 24,6 horas. Por lo tanto, un observador colocado en la superficie del planeta vería salir a Fobos por el oeste, y al revés que la luna de la Tierra, lo vería moverse rápidamente por el cielo y ponerse por el este. El mismo observador vería a Deimos arrastrarse por el cielo de este a oeste, tardando unas 60 horas en desplazarse de un horizonte al otro. Ninguno de estos trayectos sería demasiado espectacular. Deimos despediría casi el mismo resplandor que luce Venus en el cielo terrestre. Fobos, que es el más próximo y el mayor, sería varias magnitudes más brillante, pero, con todo, resultaría un espectáculo mucho más discreto que el más delgado de los cuartos de la luna terrestre. Además, como las órbitas de Fobos y de Deimos están sobre el plano del ecuador marciano y muy cerca de la superficie del planeta, ninguno de los dos satélites sería visible desde los polos. El observador debería estar a una latitud inferior a 82 grados para ver a Deimos, e inferior a los 69 grados para Fobos.

Las observaciones efectuadas a lo largo de las últimas décadas indican que la velocidad orbital de Fobos aumenta lentamente. El fenómeno, llamado aceleración secular, fue apreciado por

IMAGEN DE FOBOS, la mayor de las dos lunas de Marte. Es una de las 27 obtenidas por el *Mariner 9.* Se destaca el cráter que debe su nombre a Asaph Hall, descubridor de las lunas; tiene seis kilómetros de diámetro. La imagen está orientada de modo que la iluminación vaya de arriba abajo; en el caso contrario, el relieve aparente de los cráteres y de otros rasgos de la superficie tendería a invertirse.

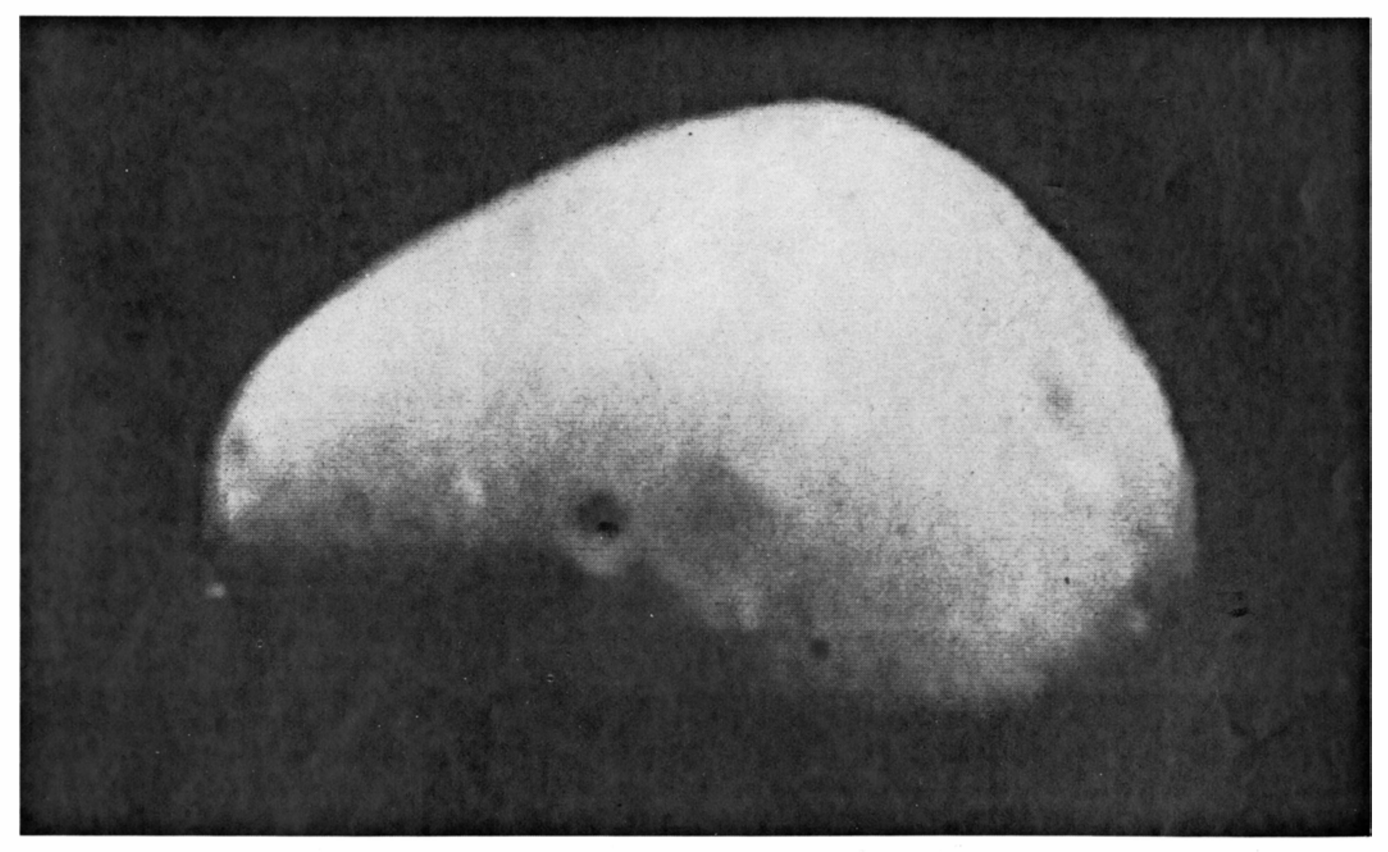
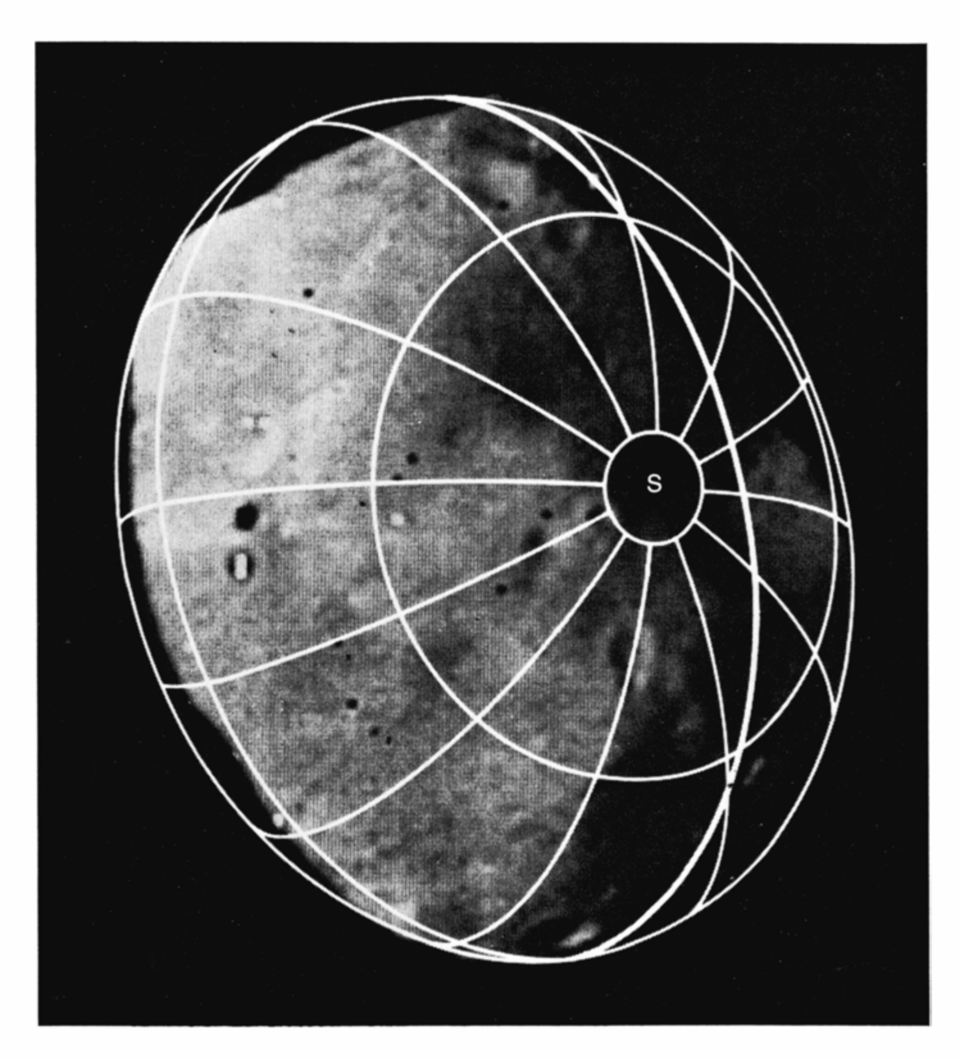
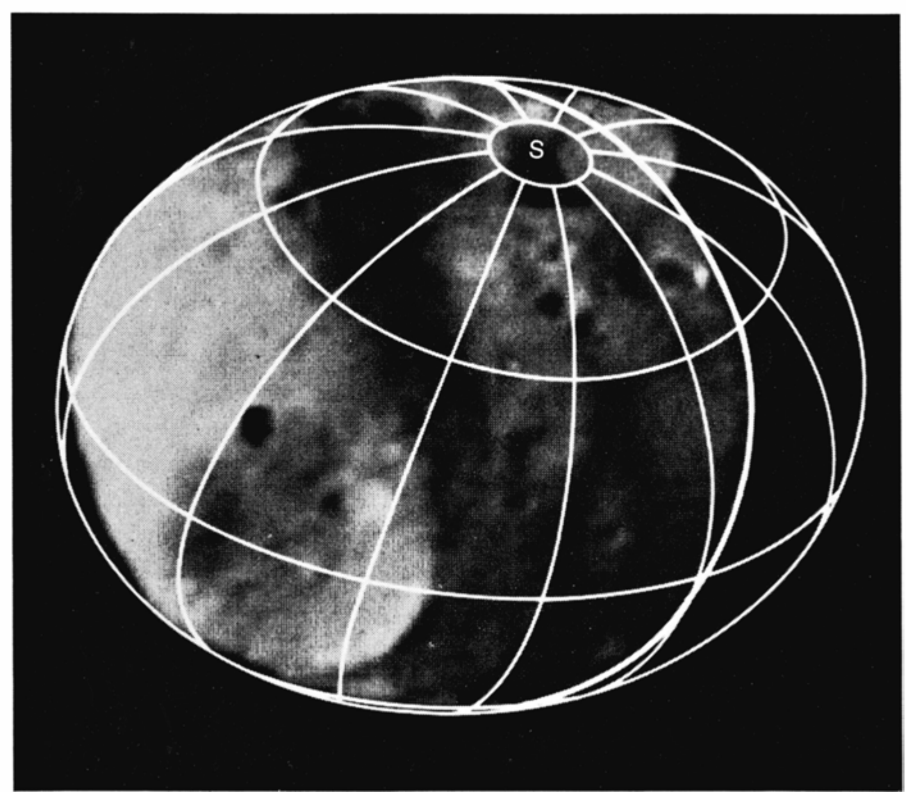


IMAGEN DE DEIMOS, la menor y más distante de las dos lunas. El nítido cráter circular, que se distingue cerca del centro, se llama Swift; mide un kilómetro de diámetro. El cráter desgastado, de dos kilómetros de diámetro, que está a la derecha, es el cráter Voltaire.





EL SISTEMA DE COORDENADAS para Fobos está superpuesto a las imágenes del satélite en dos orientaciones. La geometria de las coordenadas está basada en un modelo elipsoidal, de tres ejes, del satélite desarrollado por Thomas C. Duxbury. Como indican las dos diferentes superposiciones, dejando aparte algunos trozos que faltan de la luna, el modelo da un buen ajuste.

primera vez en 1945 por A. B. Sharpless. del Naval Observatory. Hasta hace poco se discutía sobre la realidad de esta aceleración. Sin embargo, las observaciones de Fobos registradas durante la misión del *Mariner 9,* en 1971-1972, han sido extensamente analizadas por Thomas C. Duxbury y G. H. Born, del laboratorio de propulsión a chorro del Instituto de Tecnología de California. Según las mismas, Fobos acelera a un ritmo anual de unos 0,001 grados por año al cuadrado. V. A. Shor, del Instituto de Astronomía Teórica de Leningrado, ha llegado, por su cuenta, a una cifra similar. La aceleración parece ser atribuible a un frenado por efecto de marea. Esto puede parecer paradójico, ya que se espera que un frenado reduzca la velocidad, en vez de acelerarla. El frenado haría perder energía a Fobos, pero ello le induciría a acercarse a Marte. Luego, el satélite se movería con mayor rapidez sobre la órbita más pequeña. Suponiendo que la aceleración secular se mantuviera en su valor actual, Fobos debería estrellarse sobre la superficie de Marte dentro de unos 100 millones de años.

El tamaño de Fobos y Deimos constituyó un óbice a la hora de medirlo directamente con telescopios situados en la Tierra. Las primeras estimaciones de sus diámetros eran suposiciones razonables basadas en los brillos observados. Las primeras observaciones fotométricas de las dos lunas fueron hechas por Oliver C. Wendell y Edward C. Pickering, en el Observatorio de la Universidad de Harvard, entre 1877 y 1882. Las observaciones eran burdas, pero mostraban que Fobos brillaba más que Deimos. Tal vez fuera muy significativa la conclusión de Pickering, según la cual las dos lunas no eran del mismo color que Marte: el planeta era rojizo; aquéllas, grisáceas. Según ello, la superficie de los satélites no podía estar formada por el mismo material que componía la de Marte.

Las primeras observaciones fotométricas modernas de Fobos y Deimos tardaron en realizarse hasta que G. P. Kuiper emprendió la tarea durante una oposición favorable, en 1956. Kuiper encontró que Fobos era unas tres veces más brillante que Deimos. Suponiendo que los dos dos cuerpos fueran esféricos y que sus superficies reflejaran aproximadamente el mismo 11 por ciento de la luz solar que la superficie de la luna terrestre, calculó que Fobos tenía un diámetro de 12 kilómetros y Deimos otro de seis kilómetros.

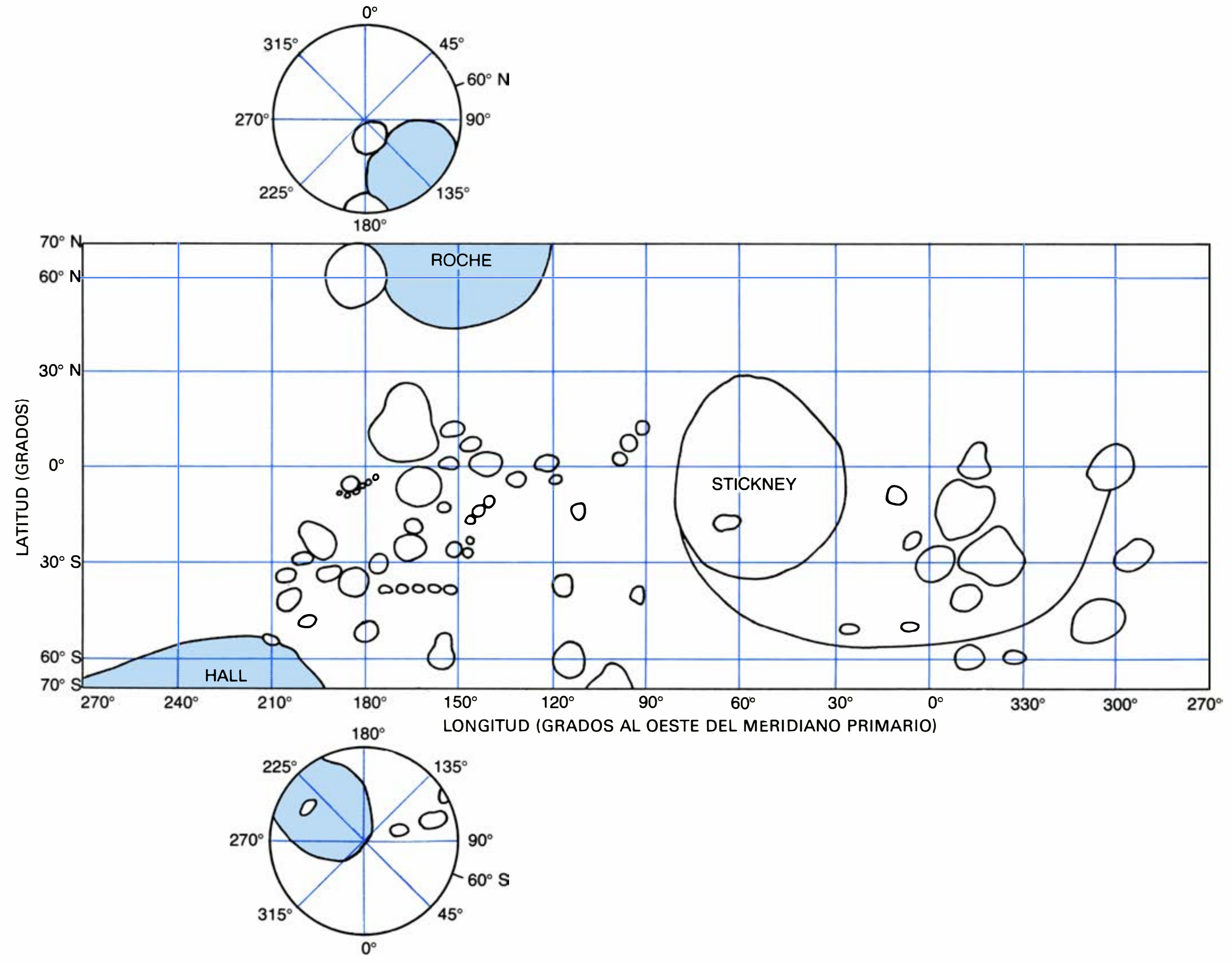
La primera medición del tamaño de

Fobos llegó trece años más tarde. En 1969, la cámara de alta resolución a bordo del *Mariner 7* captó la silueta de Fobos, recortada sobre el disco del planeta. La imagen cubría escasamente siete elementos de la fotografía, pero mostraba que Fobos era de forma irregular y mucho mayor que lo que Kuiper había estimado. Trabajando sobre los datos del *Mariner 7*, B. A. Smith, de la Universidad Estatal de New Mexico, calculó que Fobos tenía unos 17 kilómetros de longitud y 23 kilómetros de anchura. El hecho de que el tamaño fuera mayor que lo que Kuiper había calculado en base a un material con el mismo poder reflejante que la luna terrestre en la superficie, indicaba que la reflectividad de dicho material era, en realidad, sólo la mitad de la reflectividad de la luna terrestre.

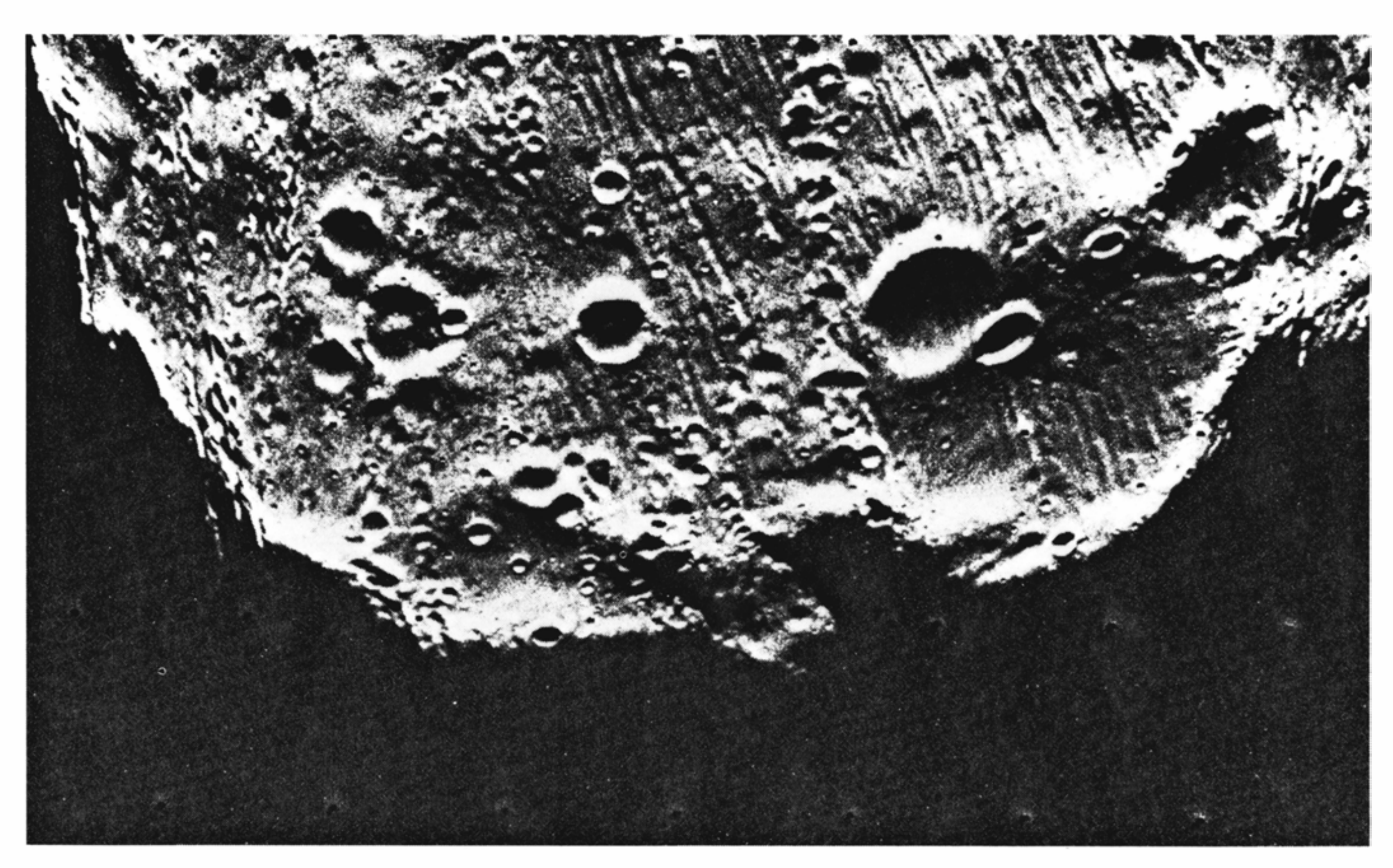
La exploración detallada de ambos satélites marcianos empezó el 14 de noviembre de 1971, cuando el *Mariner 9* se puso en órbita alrededor de Marte. Durante su vida útil, el *Mariner 9* obtuvo 27 vistas de Fobos y 9 de Deimos. Por término medio, la resolución permitía mostrar cualquier forma de más de 200 metros de diámetro. El conjunto de imágenes de Fobos era lo bastante completo como para que fuera posible trazar un mapa de la mayor parte de la superficie del satélite y para determinar su forma con considerable precisión. Si se atendía a la observación desde el *Mariner 7*, Fobos era irregular. El análisis de los datos del *Mariner 9* por Duxbury muestra, sin embargo, que es un elipsoide de tres ejes, dejando aparte algunas rebanadas que faltan. Sus diámetros principales miden 27, 21 y 19 kilómetros.

La cobertura de Deimos por el *Mariner 9* fue menos completa, debido a que sólo se pudo fotografiar el lado del satélite que mira al planeta Marte. Sin embargo, los análisis de ese conjunto de imágenes limitado sugieren que también la figura de Deimos se acerca a la de un elipsoide, con diámetros principales de 15,12 y 11 kilómetros. Hay ligeras irregularidades en el elipsoide, como las hay en el de Fobos, pero queda el hecho peculiar de que las dos lunas de Marte son casi idénticas en su forma.

Siguiéndole la pista a formas individuales de la superficie de cada satélite, los analistas del conjunto de imágenes del *Mariner 9* pudieron determinar que tanto Fobos como Deimos giran sincrónicamente en su revolución en torno a Marte. Es decir, el mismo lado de cada satélite mira siempre al planeta, como el mismo lado de la luna terrestre mira siempre a la Tierra. Si se coloca un cuerpo pequeño e irregular girando rápidamente en las proximidades de un cuerpo mayor, la fricción por marea frena, con el paso del tiempo, el ritmo de rotación del cuerpo más pequeño, hasta que se hace síncrono con el ritmo de rotación del cuerpo mayor. El tiempo necesario para alcanzar la rotación síncrona está relacio-



LOS RASGOS DE LA SUPERFICIE DE FOBOS, entre los 70 grados norte y los 70 grados sur de latitud, aparecen en la parte central de este mapa, una proyección preparada por Duxbury en base a las imágenes del *Mariner 9*. El mayor cráter de Fobos, Stickney, aparece a la derecha; tiene un diámetro máximo de 10 kilómetros. El cráter que le sigue en tamaño, Hall, cae en la región polar sur del satélite *(color)*; en la proyección central aparece sólo su borde norte. La mayor parte del cráter Roche cae en la región polar norte *(color)*.



VISTA DE FOBOS; desde la región polar norte *(derecha)* hasta un poco más abajo de la línea del ecuador *(izquierda)*; cubre 70 grados de longitud en su anchura máxima. El área total es de 9 por 18 kilómetros. La imagen fue obtenida por el *Viking 2* en órbita, en septiembre de 1976, cuando se hallaba a menos de 900 kilómetros de distancia. Con esta resolución, que hace visibles los objetos de 40 o más metros de diámetro, se evidencia una serie de surcos paralelos. La causa de estas curiosas marcas regulares sigue siendo algo que todavía no está explicado del todo.

0°
40° N
180°
225°
270°
135°
315°
90°
45°
0°
TERMINADOR

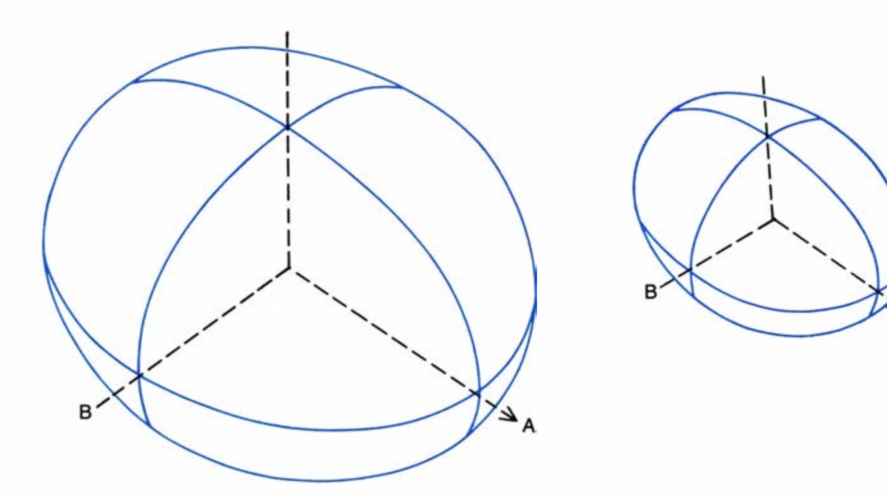
MAPA ESQUEMATICO, basado en el sistema de coordenadas ideado para el modelo de Fobos de Duxbury. Relaciona las imágenes del *Viking 2* con el mapa de la superficie del satélite de la página anterior. El área sombreada cae al este del límite entre el hemisferio claro y el oscuro.

nado, entre otras cosas, con la distancia entre los dos cuerpos: cuanto más cerca está un satélite de un planeta, tanto más corto es el tiempo de frenado de la rotación. Además, cuanto más irregular es la forma del satélite y más excéntrica su órbita, tanto más corto es dicho tiempo de frenado. Para Deimos, un ritmo de rotación síncrono con el de Marte debe haberse alcanzado al cabo de un plazo de uno a 100 millones de años. Para Fobos, mucho más próximo a Marte, se debe haber alcanzado a los 10.000-1.000.000 años. Tales cálculos ponen un límite inferior al tiempo transcurrido desde que los satélites entraron en rotación por última vez. Dicha rotación pudo haber sido inducida por el impacto de un cascote interplanetario.

Antes de contar con el conjunto de imágenes aportadas por el *Mariner 9*, el aspecto probable de la superficie de cuerpos pequeños como Fobos y Deimos era tema de debate. Para que un objeto se escape desde la luna terrestre debe llevar una velocidad de 2380 metros por segundo, mientras que para escaparse de Fobos necesita sólo una velocidad de unos 15 metros por segundo. Una velocidad de escape tan pequeña significa que, cuando un fragmento de cascote interplanetario choca con Fobos, la mayor parte de los productos de la colisión salen disparados hacia el espacio. Una de las incógnitas era, pues, si se formarían cráteres visibles sobre cuerpos tan pequeños. ¿Dejarían las colisiones sólo magulladuras o levantarían cráteres con bordes alzados, como ocurre en cuerpos mayores, verbigracia, la luna terrestre?

Las imágenes del *Mariner 9* respondieron a esa preguna: Fobos y Deimos mostraban una profusión de cráteres con rebordes, fácilmente identificables hasta en el límite de resolución de las imágenes. Además, los cráteres de Fobos tenían todas las formas posibles, desde perfil alargado, con forma de ojo de cerradura, hasta otros que eran perfectamente circulares. Había también una amplia gama de "edades" en los cráteres, desde los que parecían ser cráteres jóvenes, con un reborde ostensiblemente alzado, hasta depresiones erosionadas tan poco profundas que resultaban escasamente visibles. Era de notar la ausencia de características prominentes en la superficie de la luna terrestre, como las capas de material eyectado o los cráteres con un pico central. Dada la escasa gravedad de Fobos, su ausencia resultaba comprensible.

Los dos mayores cráteres del satélite se llaman Hall y Stickney, en honor del descubridor de las lunas de Marte y de su esposa, Angeline Stickney, respectivamente; ésta, se dice, lo animó durante su larga búsqueda. Sus diámetros respectivos son 6 y 10 kilómetros; el diámetro de Sitckney es, pues, un 40 por ciento del diámetro máximo del propio Fobos.



LOS TAMAÑOS RELATIVOS de las dos lunas marcianas son patentes en esta comparación de los dos modelos de Duxbury. Los diámetros principales del elipsoide de Fobos miden 27, 21 y 19 kilómetros; los del Deimos miden 15, 12 y 11 kilómetros. Las flechas del eje *A* marcan el lado que mira a Marte; los ejes *B* dibujan el plano orbital. Queda por explicar la similitud de ambas formas.

Además de calcular la forma elipsoidal de Fobos, Duxbury trazó un mapa de su superficie a partir de las imágenes obtenidas por el *Mariner 9* (*véase la ilustración de la página 35*). Como la cobertura de Deimos era sólo parcial, no se ha podido confeccionar todavía ningún mapa del satélite exterior. La cobertura detallada de Deimos es uno de los principales objetivos de las actuales misiones orbitales *Viking* a Marte. La superficie de Deimos es muy parecida a la de Fobos, aunque tal vez sea algo menos rugosa. El mayor de los cráteres de Deimos detectados por el *Mariner 9* es una estructura erosionada de dos kilómetros de diámetro, bautizada con el nombre de Voltaire. Junto a él, existe otro cráter de un kilómetro, con un reborde muy saliente, denominado Swift en honor del literato que dio publicidad a las lunas ficticias de Kepler. El abierto contraste entre el contorno suave de Voltaire y el afilado de Swift demuestra la eficacia de los procesos erosivos incluso en cuerpos tan pequeños como éste. Las principales fuerzas responsables del desgaste de los cráteres en Deimos deben ser el picado producido por impactos de escasa velocidad y las voladuras causadas por los de alta velocidad.

Los impactos responsables de los cráteres mayores de las lunas de Marte han modificado, sin duda, la forma de ambos satélites. Por ejemplo, la colisión que hizo surgir a Stickney debió generar fuertes ondas de choque a través de Fobos y, probablemente, incluso le arrancó grandes trozos. Los efectos de tales impactos de alta velocidad sobre cuerpos pequeños han sido simulados en el laboratorio por Donald E. Gault y sus colaboradores, en el Centro de Investigación Ames de la NASA. Trabajando con blancos esféricos, están estudiando los efectos de impactos de diversa energía. Los impactos de baja energía dejan una cicatriz parecida a un cráter sobre el blanco, con la lesión concentrada en el área de contacto. Los impactos de alta energía producen el astillado de grandes trozos del blanco. Tal astillado se concentra en la cara de la esfera opuesta al punto del impacto y, a menudo, toda la capa externa del blanco salta, dejando sólo el núcleo interior. La forma de esos núcleos interiores es sorprendentemente parecida a la de Fobos y Deimos. Ambas lunas tienen bordes afilados y salientes, lo cual sugiere que su forma presente es el resultado de impactos de alta energía.

En vista de la verosimilitud de que la formación de los mayores cráteres de Deimos y Fobos haya estado acompañada de astillado, será interesante estudiar la densidad de cráteres en las regiones de ambos satélites opuestas a alguno de los cráteres mayores. La cobertura del *Mariner 9* no es adecuada para este fin, pero están empezando a llegar valiosos datos registrados por los *Viking* en órbita. Por ejemplo, ahora sabemos que una zona con abundantes cráteres secundarios, visible en una imagen de Fobos tomada por un *Viking*, cae en el lado opuesto al impacto principal que representa Stickney.

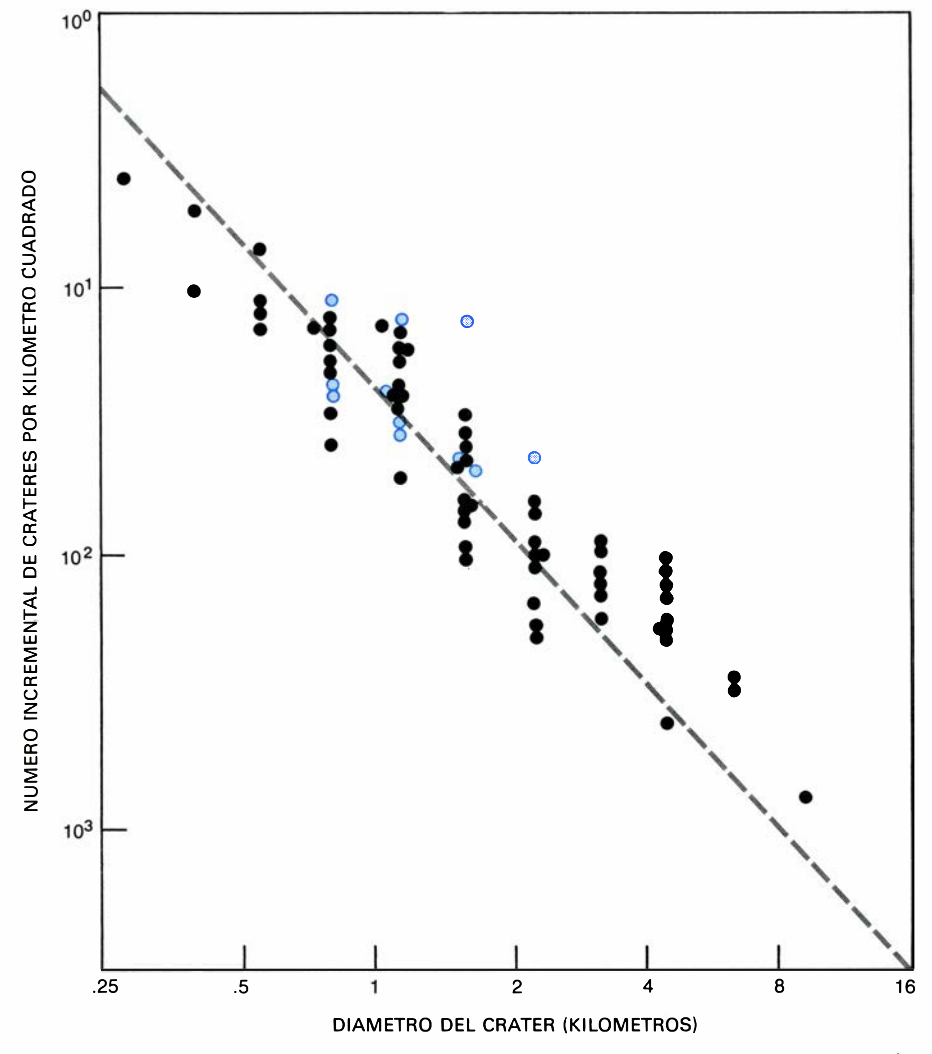
Las superficies de ambas lunas marcianas, como la de las tierras altas de la luna terrestre, están saturadas de cráte-

res. En base a esta observación, James B. Pollack, del Ames Research Center, arguye que Fobos y Deimos tienen por lo menos 1500 millones de años y pueden, de hecho, datar del nacimiento del sistema solar hace unos 4500 millones de años. Los bordes afilados, bien visibles en ambas lunas, sugieren que tienen la consistencia global de roca sólida. Unas aglomeraciones de cascotes sueltos, ligados sólo por pequeñas fuerzas gravitatorias, no se quebrarían ciertamente de esa manera.

Sin embargo, por lo menos la superficie de los satélites está compuesta por una capa de residuos, producida por impactos, que se conoce por regolita. Tal interpretación se apoya en dos pruebas. La primera es la prueba óptica: modo de difusión de la luz solar por la superficie. La segunda es la prueba térmica: modo de calentarse dicha superficie.

B. Zellner fue quien logró medir, en 1971, el grado de polarización de la luz difundida por la superficie de Deimos: el torrente de luz difundida por el propio Marte hace que ésa sea una medición telescópica extremadamente difícil. Zellner encontró que la superficie de Deimos polarizaba la luz solar de un modo totalmente opuesto al característico de las rocas compactas, mientras que era análogo a la de una superficie compuesta de algún polvo oscuro.

Casi al mismo tiempo en que Zellner daba a conocer sus observaciones, unos instrumentos a bordo del *Mariner 9* registraron pruebas complementarias. Entre los experimentos del *Mariner 9* se contaba la medición de la radiación infrarroja de Fobos, antes y después de que el planeta atravesara la sombra de Marte, en su rápida jornada en torno al planeta. La cuestión a dilucidar era la siguiente: ¿Cómo se calentaría Fobos después de haberse enfriado en la sombra? ¿Lo haría lentamente? Un calentamiento lento indicaría una superficie compacta, tal vez sólida, caracterizada por una elevada conductividad térmica. Las observaciones infrarrojas mostraron que la superficie de Fobos se calentaba con notable rapidez, después de que el satélite emergía de la sombra de Marte, lo que indicaba una capa superficial con una conductividad térmica extremadamente baja, característica de un polvo. El experimento era sensible a la temperatura de los últimos milímetros de la superficie externa: por lo tanto, al menos esta parte de la superficie era regolita en polvo.

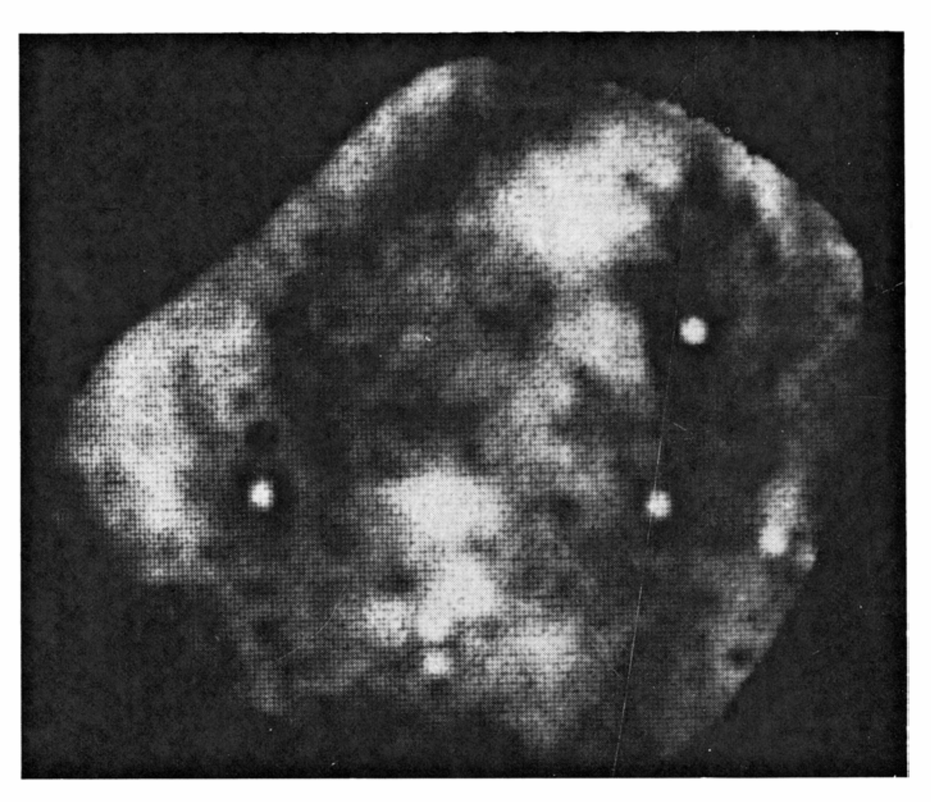


LA POBLACION DE CRATERES de las lunas de Marte, comparada con la población de cráteres de la luna terrestre. La línea recta muestra la tendencia para las altiplanicies más pobladas de cráteres de la luna terrestre, que están "saturadas"; el número de cráteres no puede aumentar porque los nuevos cráteres suprimen a los más antiguos. Las imágenes del *Mariner 9* indican que Fobos y Deimos también están saturados. Muestran 62 cráteres en Fobos *(negro)* y 11 en Deimos *(color)*. No obstante, sólo se ha visto una cara de Deimos.

Otras pruebas obtenidas con el *Mariner 9* apoyan también las observaciones telescópicas de Zellner. Michael Noland y el autor, en la Universidad de Cornell, han utilizado los datos del *Mariner 9* para analizar las propiedades difusoras de la luz de las superficies de Fobos y Deimos. Ambas superficies difunden la luz solar de un modo que es característico de una superficie oscura con una estructura intrincada. Por ejemplo, cuando semejante superficie se observa bajo un ángulo igual al de iluminación, no hay reflejo o aumento de brillo. Las propiedades difusoras de la luz de Fobos y Deimos se parecen a las de ciertas zonas de la luna terrestre. En dichas zonas, la superficie no es sólo lo bastante oscura para impedir la difusión de la mayoría de los fotones incidentes, sino también tan intrincada en su textura que cada uno de sus elementos superficiales tiene abundantes rincones y hendiduras que atrapan la mayor parte de los fotones que llegan a ser difundidos. Nuestro estudio de los datos del *Mariner 9* sugieren que ambos satélites de Marte están cubiertos de una capa homogénea de regolita que posee esas propiedades de absorción de la luz. Hemos buscado cuidadosamente retazos de roca desnuda, pero por ahora no hemos encontrado ninguno. Sin embargo tal vez resulte poco acertado pensar que la regolita dispuesta sobre cuerpos pequeños, como las lunas de Marte, sea exactamente igual a la regolita de la luna terrestre. Pero hasta que no hayamos recogido muestras de las capas superficiales de varios cuerpos pequeños no podremos saber cuáles son las diferencias entre las dos clases de regolita.

¿Cómo retiene regolita un cuerpo tan pequeño como Fobos? Nadie lo sabe con certeza. La explicación más extendida apela a lo que se llama la cola de baja velocidad de los residuos que se forman por impactos. Típicamente, el objeto que choca imparte una amplia gama de velocidades a las partículas del residuo. Si la velocidad que se requiere

para escapar del cuerpo de origen es pequeña, la mayor parte de las partículas disparadas se perderán en el espacio. Sin embargo, cierta fracción del residuo no alcanzará la velocidad de escape y seguirá apresada por la gravedad del cuerpo de origen. No es necesario que la fracción capturada sea grande para llegar a cubrirlo con una capa de polvo fino. Se está obteniendo algunas estimaciones de la fracción que se necesita para formar esa capa, a partir de los experimentos de laboratorio con impactos de alta velocidad, pero siguen siendo inciertas. Sin embargo, las observaciones de los *Viking* en órbita indican que muchos de los cráteres de Fobos son secundarios, es decir, que fueron hechos por objetos lanzados por impactos primarios. Esos cráteres suministran una prueba directa de que algún residuo del impacto ha caído de nuevo sobre la superficie del satélite.



UNA IMAGEN DE DEIMOS obtenida por el *Mariner 9*, tratada de un modo especial para destacar las diferencias de brillo. Se vio que la banda central brillaba un tercio más que el resto de la superficie del satélite. Sin embargo, la franja más brillante refleja sólo el 8 por ciento de la luz solar incidente. La reflectancia de la Luna, que se considera baja, es del 11 por ciento. Los tres puntos brillantes con bordes negros son artefactos del tratamiento de la imagen.

Se ha sugerido que Deimos y Fobos tienen un recubrimiento superficial de regolita porque están cerca de Marte. El argumento lleva a la conclusión de que cuerpos pequeños parecidos, del cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter, no deberían tener una superficie de regolita. En el caso de las lunas de Marte, si una partícula de residuo escapa hacia el espacio, debe llevar una velocidad suficiente como para escapar a la influencia gravitatoria, no sólo del satélite de origen, sino también de Marte. Si le falta la energía suficiente para escapar de Marte, la partícula puede quedar en órbita en torno al planeta y ser capturada quizás por una u otra luna. Así, las lunas de Marte tienen ocasión de recuperar una parte de los residuos. En el cinturón de asteroides no habría tal oportunidad de una segunda captura.

El razonamiento deja de lado el efecto de la cola de baja velocidad, que retendría una parte de los residuos arrojados desde la superficie de un asteroide, como es presumible que lo haga en Fobos y Deimos. Tal vez lo más importante sean las pruebas aportadas por observaciones referentes a los propios asteroides. Por ejemplo, durante el perigeo favorable del asteroide de Eros, cuerpo de tamaño comparable al de Fobos, en 1975, se sugirió, a partir de distintas observaciones telescópicas independientes, la presencia de una superficie de regolita. Tales capas de polvo podrían ser, de hecho, una característica esencial de todas las superficies sólidas del sistema solar. Experimentos recientes, llevados a cabo por Gaunt y sus colaboradores, en el Ames Research Center, muestran que, para un impacto de una energía dada, es más difícil que el residuo sea eyectado desde una capa parecida a la regolita, de partículas sueltas, que desde otra superficie de roca compacta. Lo cual da a entender que, una vez formada la regolita, ésta tiende a mantenerse y autoperpetuarse.

En las longitudes de onda de la luz visible, la reflectancia de Fobos y Deimos es de un 6 por ciento, valor que debe compararse con el 11 por ciento de la luna terrestre. En lo que se refiere a la reflectancia, la superficie de Fobos resulta homogénea. En Deimos, sin embargo, hay algunas zonas más brillantes que el resto. Fundándose en los datos del *Mariner 9*, Noland y el autor han calculado que el brillo de uno de esos retazos supera en un 30 por ciento a la media, aproximadamente. Esto sitúa su reflectancia alrededor del 8 por ciento, en vez del 6 por ciento, lo cual sigue indicando una superficie muy obscura.

Suele suponerse que Fobos y Deimos tienen un origen común. No hay ninguna prueba concluyente en favor de esta hipótesis, pero un argumento que se cita en su favor es el de la similitud en la orientación de las órbitas de las dos lunas. Sus características fotométricas constituyen, quizá, una prueba más sólida todavía en favor de un origen común. Las hipótesis acerca del origen de las lunas marcianas se reparten entre dos escuelas principales: captura y acreción.

Los que están a favor de la hipótesis de la acreción consideran a ambos satélites como reuniones de material desgajado durante la formación de Marte. Una hipótesis verosímil, en cuanto a la captura, contempla un gran asteroide que pasara junto a Marte y se rompiera durante el paso, después de lo cual por lo menos dos de sus mayores fragmentos serían capturados por el planeta y permanecerían en órbita a su alrededor. Esta hipótesis tiene en favor suyo la simplicidad, pero deja sin respuesta ciertas cuestiones técnicas. Por ejemplo, ¿cómo funcionaría ese proceso de ruptura? ¿De qué modo irían a parar las órbitas de ambos al plano ecuatorial del planeta?

No existen pruebas suficientes para abogar por un modelo definitivo del origen de Fobos y Deimos. La composición de las superficies de los satélites podría suministrar, por ejemplo, indicios importantes en relación con su origen, pero, por ahora, nadie sabe de qué están constituidas las superficies. El medio astronómico habitual para determinar la composición de un objeto sólido es descubrir cómo refleja diferentes longitudes de onda de la radiación electromagnética, incluyendo la luz. Carecemos, pura y simplemente, de mediciones es-

pectrales adecuadas de la reflectancia de Fobos y Deimos: hasta este momento, todos nuestros argumentos acerca de su composición son indirectos.

Puesto que ambas lunas son muy oscuras, se dice muy a menudo que este solo hecho hace verosímil que el material de la superficie sea similar al basalto, a una roca ígnea oscura o al material de la clase de meteoritos quebradizos conocida por condritas carbonáceas. Este tipo de razonamiento no puede ser concluyente, ya que la negrura no es, por sí misma, una propiedad que permita diagnosticar una superficie.

Para zanjar la cuestión del origen debemos averiguar de qué están hechos Fobos y Deimos. Si se probara que el material es basáltico, los satélites serían, casi con certeza, fragmentos de un cuerpo, o cuerpos, mucho mayores. La formación del basalto necesita fusión y separación de minerales en un cuerpo de origen, y no es nada verosímil que tales procesos pudieran producirse en objetos tan pequeños como las lunas de Marte. Si Fobos y Deimos son efectivamente basálticos, ello favorecería el que fueran fragmentos de una gran (y, por tanto, diferenciada) luna de Marte, destrozada hace mucho en alguna colisión catastrófica. El que fueran fragmentos de otro, o de otros, grandes cuerpos basálticos, análogamente destrozados, procedentes tal vez del cinturón de asteroides, resulta menos verosímil, debido a la escasa probabilidad de que Marte capturara tales fragmentos.

Si se demostrara que el material es parecido al de las condritas carbonáceas, Fobos y Deimos no precisarían ser fragmentos de cuerpos mayores. Podrían, en cambio, representar material de desecho de la formación del propio Marte. Sin embargo, se discute bastante si Marte incorporó o no mucho material de ese tipo durante su formación. Algunos teóricos afirman que tal material podría formarse sólo en el cinturón de asteroides, y no tan cerca del Sol como la órbita de Marte. Esto resulta casi totalmente cierto para las condritas carbonáceas clasificadas como Tipo I, al menos, que son las más ricas en compuestos volátiles. Si se demostrara que la materia de Fobos y Deimos es del Tipo I, los dos satélites serían entonces cuerpos capturados a partir de la mitad más externa del cinturón de asteroides.

Sea cual fuere su origen, Fobos y Deimos nos han suministrado nuestra mejor visión del tipo de cuerpos que pueblan, en número incontable, el cinturón de asteroides. Queda por estudiar en detalle la topografía de cualquier asteroide, pero tenemos ya una relativa riqueza de información sobre dos cuerpos que, seguramente, se parecen mucho a los asteroides. Como ellos, las lunas de Marte son pequeñas, y sus campos gravitatorios son casi insignificantes. Los cuerpos con campos gravitatorios débiles comparten tres importantes características. Primero, carecen de atmósfera. Segundo, pierden masa continuamente, como resultado de los impactos, a altas velocidades, de residuos interplanetarios. Tercero, tienden a ser de forma irregular, debido a que los grandes impactos arrancan, tal vez, grandes trozos de su superficie. Dado que tales cuerpos son demasiado pequeños para tener el tipo de fuerzas de presión internas que permitirían a la gravedad y a la rotación reajustar sus componentes a la forma esférica, retienen las formas irregulares que adquirieron.

Los dos *Viking* en órbita están circundando Marte desde el pasado verano. Entre sus tareas más importantes, se cuenta el haber ampliado la cobertura fotográfica de Fobos y Deimos y el haber hecho mediciones más refinadas de la órbita descendente de Fobos. Uno de los satélites se está acercando ahora bastante a Fobos. Deberían poderse obtener imágenes con una resolución tal que registraran rasgos de sólo 10 metros de diámetro, lo cual permitiría un estudio detallado de muchos de los cráteres menores del satélite. El mismo satélite debería pasar suficientemente cerca de ambas lunas como para "notar" su atracción gravitatoria. Esto, se espera, hará posible calcular sus masas con una precisión del 10 por ciento, en más o en menos. El conocimiento de las masas de los satélites nos permitirá determinar sus densidades medias; esto, a su vez, restringirá el margen de las especulaciones en torno a su posible constitución. Por ejemplo, el conocimiento de la densidad media de los satélites puede hacer posible eliminar del juego el material de condrita carbonácea del Tipo I, si la densidad media es de unos 2,3 gramos por centímetro cúbico, y, el basalto, si la densidad media es de 2,9 gramos.

Las imágenes de los *Viking* en órbita ya nos han llevado a mejores recuentos de la densidad de los cráteres, tanto en Fobos como en Deimos, y también al descubrimiento de enigmáticos surcos en la superficie de Fobos. La naturaleza y el origen de esas peculiares marcas paralelas quedan por explicar; si bien hay una excitante posibilidad: reflejan una estratificación que, a su vez, quizá represente corrientes sucesivas de lava en la superficie de un cuerpo original mucho mayor.

Ciencia y sociedad

Viruela contumaz

La viruela persiste, aunque con dificultades. Esta enfermedad, que el pasado verano parecía estar dando su última batalla en el desierto meridional de Etiopía, llegó, según se cree, a través de un nómada somalí infectado a la vecina Somalia, por donde se ha ido extendiendo desde que se confirmó su presencia en el mes de septiembre. En la primera semana de febrero se había descubierto 39 casos en Somalia, la mayoría de ellos en una zona limitada de Mogadiscio, su capital y puerto principal. Lo que pareció ser un brote limitado (cuatro casos) a una zona próxima a Kenia se ha trasplantado hasta Mogadiscio.

El brote registrado en Somalia ha constituido un acontecimiento frustrante en la fase final de la campaña decenal llevada a cabo por la Organización Mundial de la Salud destinada a erradicar la peste más devastadora de la historia (véase "La erradicación de la viruela", por Donald A. Henderson; *Investigación y Ciencia,* diciembre, 1976). Etiopía ha sido el último país en donde la enfermedad era endémica, y allí la campaña parece haber tenido éxito; pese a una vigilancia activa, no se ha descubierto ni un solo caso nuevo en esa nación desde el 9 de agosto del año pasado. Como el nivel general de vacunación es elevado en Somalia, parece haber escasas posibilidades de que el brote se difunda ampliamente. Con las enérgicas medidas de contención que se están adoptando ahora –aislamiento de pacientes y vacunación de los allegados– debería cortarse pronto el hilo de la transmisión. La vigilancia continuará en la región durante dos años, a partir del último caso que se registre. Luego, después de una certificación de una comisión de la OMS, se estimará que la viruela ha sido erradicada de la faz de la tierra.

Hay varias causas que determinan la erradicación absoluta –el primer logro de tal especie en la historia médica– de la viruela. La enfermedad era grave y muy temida; ello motivó un esfuerzo mundial contra la misma. Hoy existe una vacuna eficaz contra el virus de la viruela. Su prurito y sus pústulas hacen visible la enfermedad, de manera que son raros los casos asintomáticos y no detectados; los casos raros cuya lenidad no ocasiona prurito son, al parecer, demasiado leves como para transmitir la enfermedad. Y, lo que es más importante, el virus carece de huésped animal; la enfermedad se transmite sólo de persona a persona. (Existe una enfermedad parecida, la viruela del mono, que a veces se ha transmitido a personas, pero no parece transmitirse de persona a persona.) Una vez que no haya ningún humano que dé abrigo al virus, debería quedar sólo una reserva: las existencias de los laboratorios de investigación y diagnóstico. La OMS está encuestando ahora a todos los laboratorios del mundo para ubicar dichas existencias y para instar a su destrucción; se espera que sólo algunos laboratorios necesiten conservar el virus para investigación, y que pondrán en vigor rígidas medidas de seguridad.

Opiáceos internos

La morfina es la progenitora de una gran familia de drogas analgésicas conocidas genéricamente por opiáceos. En 1973, Solomon H. Snyder y Candace B. Pert, de la Johns Hopkins University School of Medicine, demostraron que los opiáceos ejercen sus efectos farmacológicos al actuar sobre receptores, o lados de unión sumamente específicos, del cerebro. Como no suele registrarse la presencia de morfina en el cuerpo, y como los receptores presuntamente cumplen una función natural, este descubrimiento estimuló la búsqueda de una substancia interna semejante a la morfina, que quizá ocupaba normalmente los lados de unión de los receptores. Los resultados han superado todas las expectativas: procedentes del cerebro y de la hipófisis se ha aislado no uno, sino cuatro compuestos que, además de tener una actividad analgésica semejante a los opiáceos, poseen una gran afinidad para con el receptor de opiáceos.

Las primeras substancias semejantes a la morfina fueron descubiertas por John Hughes y Hans W. Kosterlitz, de la Universidad de Aberdeen, e independientemente por Rabi Simantov y Snyder en la Johns Hopkins, después de que ambos grupos observaran que unos extractos de tejido cerebral podían remedar la acción de los opiáceos en pruebas farmacológicas. Ambos grupos de investigadores purificaron luego el factor activo y hallaron que era una mezcla de dos cadenas peptídicas cortas. Ambos péptidos se componen de cinco unidades de aminoácidos cuya secuencia es idéntica, excepto en el aminoácido terminal. Denominados encefalinas, del griego "en la cabeza", estos péptidos parecen comportarse como neurotransmisores; se hallan concentrados en las fibras terminales de ciertas neuronas del cerebro y de la médula espinal e inhiben el ritmo de disparo de otras células al modificar, según parece, la permeabilidad de la membrana de la célula diana a los iones sodio. Las encefalinas son rápidamente degradadas por enzimas proteolíticos, de manera que es difícil valorar su capacidad analgésica cuando se inyectan en animales por vía endovenosa o incluso directamente al cerebro. Sin embargo, con substancias análogas a las encefalinas que resisten la proteolisis metabólica, se ha podido demostrar que las encefalinas poseen una potencia analgésica parecida a la de la morfina.

Debido a la correlación que existe entre la distribución de las encefalinas y las principales vías cerebrales que intervienen en la percepción del dolor crónico y los estados emocionales concomitantes, se ha apuntado que las encefalinas quizás participen en un sistema natural de inhibición del dolor. Las drogas opiáceas podrían así ejercer sus efectos simplemente al unirse a receptores de encefalina normalmente desocupados, activando los efectos analgésicos y eufóricos del sistema encefalínico. La administración regular de opiáceos podría sobrestimular este sistema, e incluso compensarlo bioquímicamente, manifestando de ese modo los síntomas de la toxicomanía.

El interés de muchos investigadores se desplazó hacia la hipófisis cuando se advirtió que la secuencia de aminoácidos de las encefalinas era idéntica a un corto segmento de la hormona pituitaria betalipotropina, que estimula el metabolismo de las grasas. Choh Hao Li, de la Universidad de California, en Berkeley, halló posteriormente que un fragmento de la beta-lipotropina, de 31 unidades de aminoácidos, poseía un elevado grado de actividad analgésica. Se le dio el nombre de betaendorfina, es decir,

"morfina endógena"; su eficacia era 48 veces superior a la morfina si se la inyectaba directamente en el cerebro y tres veces más potente cuando se la administraba por vía endovenosa. Roger Guillemin, del Instituto Salk, aisló también un péptido pituitario con efectos analgésicos. Se le denominó alfaendorfina y tenía 16 unidades de aminoácidos.

La relación entre la beta-lipotropina, las endorfinas pituitarias y las encefalinas cerebrales sigue siendo obscura. Como los péptidos biológicamente activos suelen sintetizarse al ser desprendidos por división de péptidos precursores de mayor tamaño, cabe pensar que la beta-lipotropina o alguna secuencia parcial de ella pueda servir en el cerebro como precursor de las encefalinas. Sin embargo, esto parece improbable, porque tanto la beta-lipotropina como las endorfinas son abundantes en la hipófisis, pero escasas en el cerebro, mientras que las encefalinas son abundantes en el cerebro y en la médula espinal, pero escasas en la hipófisis. Como los efectos analgésicos y eufóricos de los opiáceos quedan mediatizados en el cerebro y en la médula espinal, pero no en la hipófisis, lo más probable es que los efectos analgésicos de las endorfinas no se relacionen con sus acciones normales. Tal vez actúan como hormonas que tienen efectos, no identificados hasta ahora, sobre otros órganos destinatarios.

La capacidad de los péptidos semejantes a los opiáceos ha despertado ilusiones respecto de la posibilidad de que tal vez esos compuestos análogos apropiados constituyan lo que se ha buscado durante largo tiempo: las drogas analgésicas que no provoquen toxicomanía o adicción.

Pero ha aparecido un problema inesperado: cuando se les administra regularmente a las ratas encefalinas o endorfinas, hacen acto de presencia muchos síntomas de la opiaceomanía. Así y todo, si la toxicomanía provocada por los péptidos en cuestión resulta ser cualitativamente más leve que la producida por los opiáceos, unos análogos de las encefalinas podrían seguir ofreciendo la promesa de ser los analgésicos ideales, poseedores de las propiedades benéficas de la morfina y carentes de los peligros o efectos negativos de la misma.

Fermiones a partir de bosones

En la aritmética de la física subatómica parece que dos enteros pueden sumar un medio.

Todas las partículas de la naturaleza pueden ordenarse en dos clases según sus "estadísticas" (que describen su comportamiento en grupos) y su momento angular de espín (que está estrechamente relacionado con su estadística). Una clase de partículas, los fermiones, obedecen a una norma que prohíbe que más de una partícula ocupe un estado determinado; el momento angular de espín de los fermiones, al ser medido en unidades fundamentales, es invariablemente semi-impar (tal como 1/2, 3/2, 5/2). La otra clase de partículas, los bosones, pueden congregarse en número ilimitado: su espín es siempre un entero (tal como 0, 1, 2). El protón, el neutrón y el electrón son fermiones; entre los bosones se cuenta el fotón, o cuanto de radiación electromagnética, y los piones, kaones y demás mesones.

Las estructuras compuestas (verbigracia, los átomos) por las partículas antedichas son fermiones o bosones, según incluyan un número impar o un número par de fermiones. Parece evidente que un compuesto hecho sólo de bosones tenga que ser siempre un bosón. Ha aparecido hace poco una vigorosa teoría que contradice este principio. Según ella, dos bosones con espín de valor entero pueden conjugarse para formar una partícula con un espín cuyo valor es semi-impar y con la estadística de un fermión.

Los bosones necesarios para esta operación son algo especiales. Uno debe llevar carga eléctrica; el otro debe ser un monopolo magnético, es decir, una partícula con carga magnética ("norte" o "sur"). Durante muchos años se sabía que la interacción de un monopolo y una carga eléctrica puntual podía generar un momento angular "extra", de igual forma que la interacción de campos magnéticos y eléctricos movía un motor eléctrico. Ahora se ha establecido que dicho objeto podría suscitarse como una solución para una teoría cuántica de campo y que el objeto sería un fermión.

El monopolo magnético se introdujo en la física para llenar un vacío en la teoría de James Maxwell sobre el electromagnetismo. Se suponía que era una partícula elemental, un objeto sin subestructura ni antecedente; no se han observado tales monopolos. Hace tres años se demostró que en el contexto de ciertas teorías, que son generalizaciones de la de Maxwell, podrían aparecer monopolos que no fuesen elementales sino compuestos de otras partículas portadoras tan sólo de cargas eléctricas. Este descubrimiento lo hicieron independientemente Gerhard't Hooft, de la Universidad de Utrecht, y Alexander M. Polyakow, del Instituto Landau de Física Teórica, que es un centro altamente especializado situado en las cercanías de la capital soviética.

Más recientemente se ha observado que los monopolos creados en las teorías maxwellianas generalizadas podrían formar estados ligados con una carga eléctrica puntual. La posibilidad de tales compuestos fue sugerida de manera independiente, y a partir de distintas premisas, por Hooft y Peter Hasenfratz, de Utrecht, y por Roman W. Jackiw y Claudio Rebbi, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Los informes de uno y otro equipo han aparecido en *Physical Review Letters*.

Tal como en el caso de los monopolos puntuales, un monopolo compuesto y carente de espín, ligado a una carga eléctrica sin espín, podría tener un momento angular de espín igual a 1/2. El problema estadístico correspondiente a tal objeto fue analizado por Alfred S. Goldhaber, de la Universidad estatal de Nueva York, en Stony Brook. Goldhaber, quien mandó su comunicación también a *Physical Review Letters*, demostró que la nueva partícula sería un fermión; a saber, un fermión compuesto enteramente de bosones.

Estos avances teóricos muestran que puede originarse un fermión a partir de unos bosones apropiados, pero no aportan pruebas respecto de que ninguno de los fermiones conocidos esté construido de esa manera. De hecho, en lo concerniente a fermiones conocidos, tales como el electrón o el protón, dicha estructura es imposible, puesto que cerca de dichas partículas no se registra ningún campo magnético fuerte del monopolo. Un conjunto más verosímil de candidatos podrían ser los quarks, los presuntos constituyentes de protones, neutrones y partículas conexas. Pero no se han detectado los quarks propiamente dichos, y sus propiedades magnéticas se desconocen.

La distinción entre fermiones y bosones es muy importante, toda vez que estas dos clases de partículas parecen cumplir un papel diferente en la naturaleza. En cierto sentido, el mundo está hecho de fermiones, que actúan recíprocamente intercambiando bosones. Ahora parece posible, aunque la certeza de ello está muy lejana, que este modelo del universo podría simplificarse eliminando una de las categorías fundamentales y describiendo a los fermiones como compuestos que se forman a partir de bosones.

Comunicaciones intercontinentales por satélite

Un sistema con 12 años de existencia proporciona más de 400 enlaces de microondas entre 80 países. Sus ocho satélites en órbita, transoceánicos, soportan en la actualidad casi los dos tercios de las comunicaciones mundiales

Burton I. Edelson

En los doce años transcurridos desde el lanzamiento del *Pájaro del Alba*, primero de los satélites de comunicaciones comerciales del mundo, la utilización del espacio para las comunicaciones ha ido aumentando progresivamente, desde un pequeño satélite con capacidad para 240 circuitos telefónicos bidireccionales hasta llegar a una red integrada, en la que ocho satélites en órbita ofrecen a los seis continentes una capacidad combinada de unos 40.000 circuitos. En 1976, la Organización Internacional de Satélites de Telecomunicación (Intelsat), formada por las 95 naciones que explotan la red, obtuvo unos beneficios superiores a los 140 millones de dólares. Los servicios permanentes de telefonía, telegrafía y de transmisión de datos, ocupan el 86 por ciento del tráfico de los satélites. La televisión y otros servicios ocasionales y especiales completan el resto. La inversión total realizada por Intelsat es ligeramente superior a los 650 millones de dólares. Similar a esta cifra es la inversión que los países participantes han hecho en estaciones terrestres y servicios de apoyo. Cuando el *Pájaro del Alba (Intelsat I)* hizo posible por primera vez, en junio de 1965, la transmisión comercial de imágenes de televisión en directo, a través del Atlántico, la tarifa de la red por hora de transmisión en color era de 22.350 dólares. Desde entonces, se ha rebajado esta tarifa casi en un 80 por ciento, siendo en la actualidad de 5100 dólares.

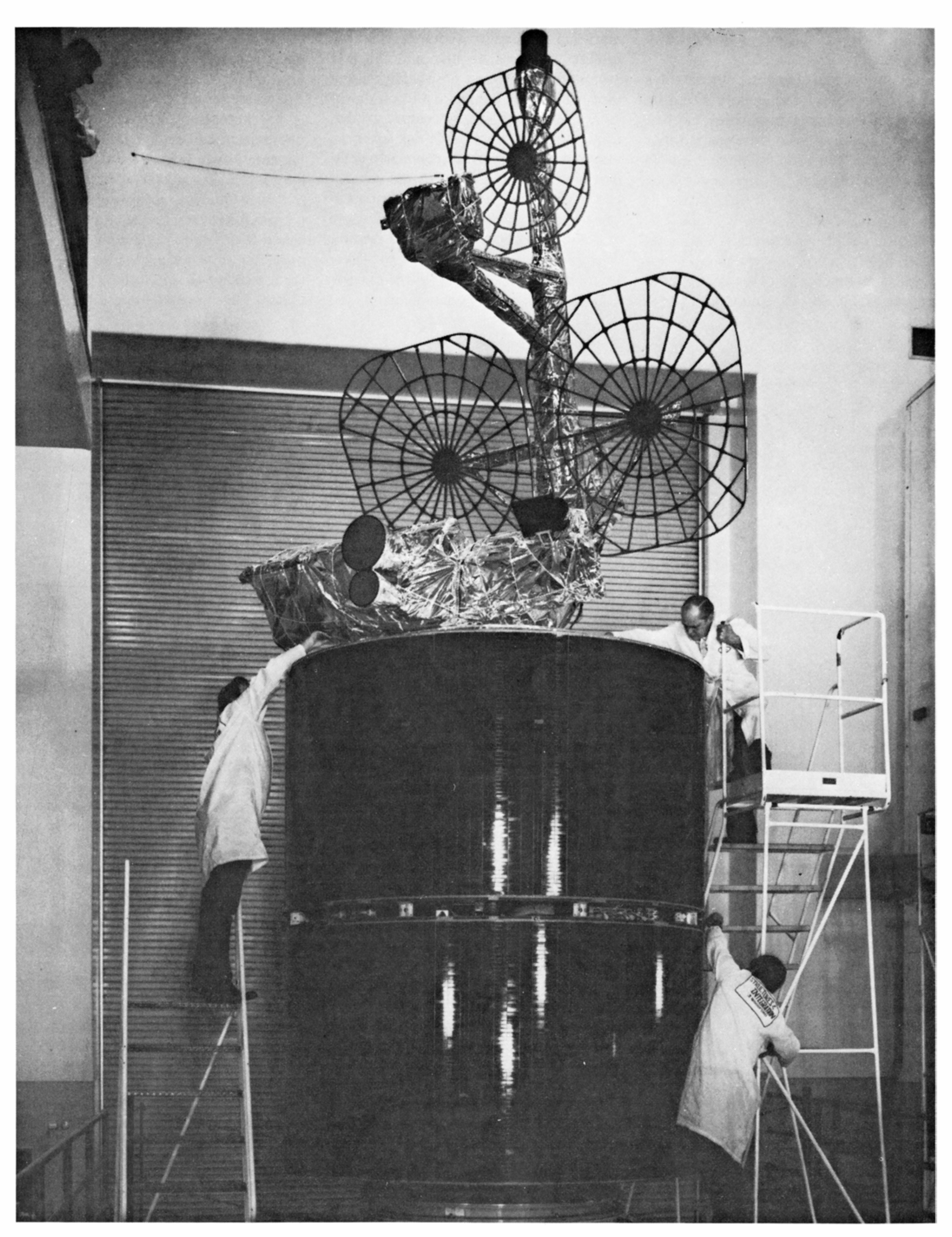
En 1945, se propuso, por vez primera, la utilización de los satélites para la repetición de señales de radio, en un artículo publicado en *Wireless World*, por Arthur C. Clarke, a la sazón un obscuro ingeniero al servicio del British Post Office. Doce años más tarde, siendo ya famoso escritor de ciencia-ficción, Clarke repitió la profecía (casualmente pocas semanas antes del lanzamiento del primer *Sputnik*). "Puede ser prematuro, si no ridículo, escribió en 1957, hablar de las posibilidades comerciales de los satélites; con todo, la aviación empezó a ser comercial a los 30 años de su nacimiento; en el caso del satélite existen razones importantes para pensar que la escala de tiempo puede reducirse, dado su inmenso valor en el campo de las comunicaciones".

En los Estados Unidos, John R. Pierce, físico de los Bell Telephone Laboratories, a quien no le habían llegado las afirmaciones de Clarke, sugería por su parte sistemas repetidores intercontinentales que operasen con satélites múltiples en órbitas de baja altura o bien con tres satélites en órbitas estacionarias superiores. Pierce, sin embargo, quedó impresionado al enterarse de que el primer cable submarino de 36 canales que entonces se estaba tendiendo bajo el Atlántico, para enlazar Norteamérica y Europa, costaría unos 35 millones de dólares. Y se preguntaba "si un canal con una capacidad 30 veces mayor, equipado para 1080 conversaciones telefónicas o una señal de TV, podría valer 30 × 35 millones de dólares, es decir, mil millones de dólares". Intuyó que los satélites ofrecerían, a buen seguro, una solución técnica más económica. Veinte años después, la Hughes Aircraft Company diseñaba para Intelsat el *Intelsat IV-A*, con capacidad para 6000 circuitos telefónicos. Intelsat pagó 23 millones de dólares por el satélite, más otros 23 millones que abonaría a la National Aeronautics and Space Administration (NASA) por ponerlo en órbita.

Los primeros experimentos

La actual red Intelsat es el resultado de un importante programa experimental en el campo de las comunicaciones por satélite, llevado a cabo en Estados Unidos en los años siguientes al lanzamiento del primer *Sputnik*, y subvencionado por el Gobierno y la industria. Los primeros ensayos significativos se realizaron a principios de 1960 con el *Echo*, un globo de aluminio de 30 m de diámetro, que actuaba como repetidor positivo de las señales de radio desde una órbita situada a 1800 kilómetros de la tierra. El *Telstar*, satélite de comunicaciones activo, fue construido por la American Telephone and Telegraph Company, y lanzado en 1962. Dos años más tarde, la NASA construyó el *Syncom*, que había de ser el primer satélite de comunicaciones situado en órbita ecuatorial síncrona; viajaba a 35.800 km por encima del Ecuador y estaba dotado de un período orbital que se ajustaba exactamente al de rotación de la tierra, dando así la impresión de encontrarse fijo en el cielo.

Con anterioridad a este mismo experimento, la panorámica de las comunicaciones por satélite había alcanzado tan gran poder de atracción que, en julio de 1961, el Presidente Kennedy hizo pública una declaración en la que se anunciaba la política estadounidense de crear un sistema mundial de satélites de comunicación, en cuanto éste fuera técnicamente posible. Aun cuando dicha política favorecía a la propiedad y explotación privadas del sistema, era de suponer que el interés público quedaba convenientemente protegido como consecuencia de las oportunidades de participación extranjera, del uso no discriminado del sistema, del acceso equitativo al mismo, de la competencia efectiva a la hora de adquirir los equipos y de la estructura de propiedad y de control. En una rápida sucesión de hechos, el Congreso aprobó la Communications Satellite Act en 1962; en 1963 se formó la Communications Satellite Corporation (Comsat); en 1964 se organizó el consorcio internacional Intelsat y, en 1965, se puso en órbita el *Intelsat I*, primer satélite comercial destinado a las



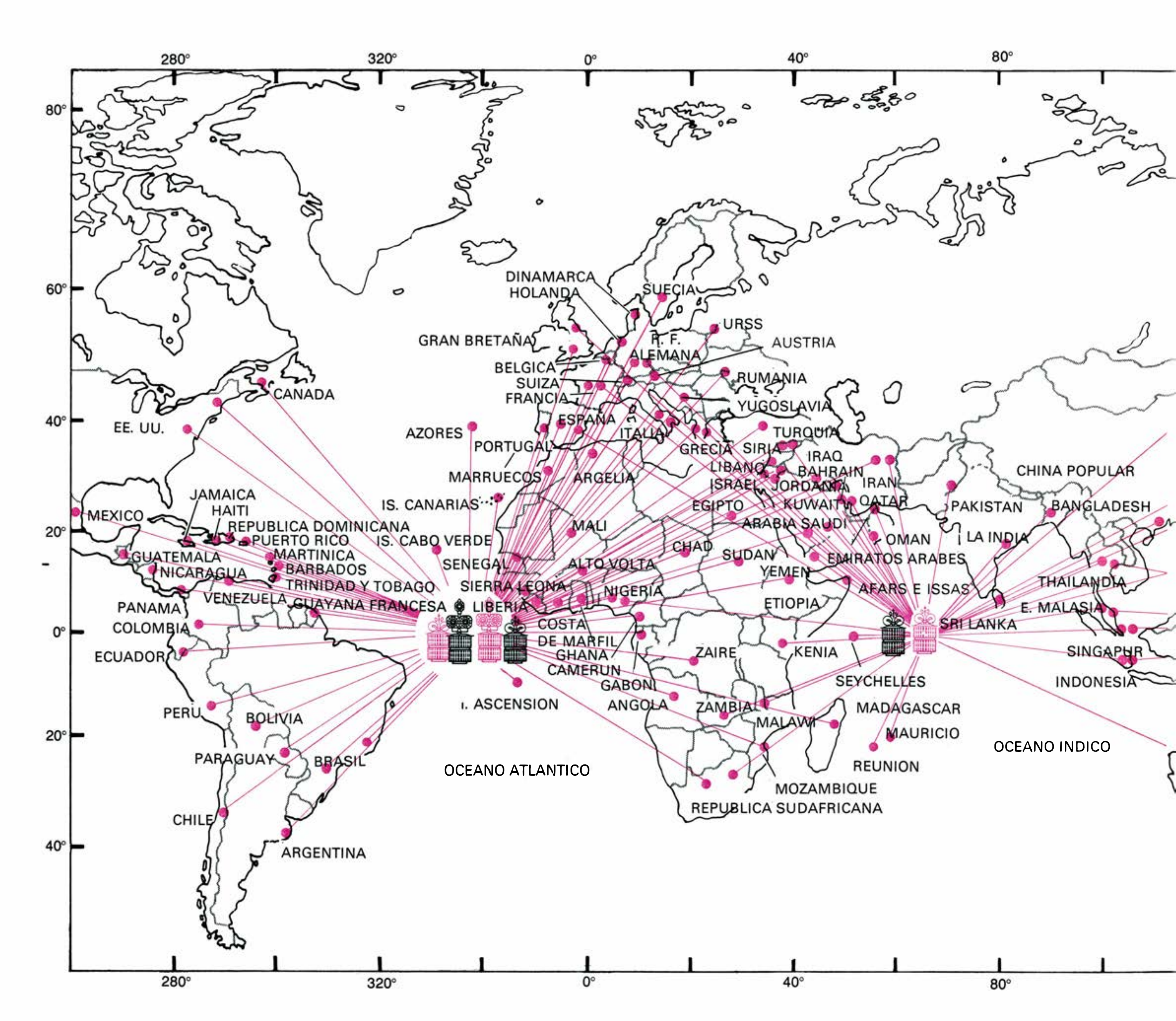
EL INTELSAT IV-A, último de los satélites de comunicación de la serie Intelsat, en las instalaciones de su casa fabricante, Hughes Aircraft Company. Los dos primeros satélites Intelsat IV-A, uno de ellos en reserva, se colocaron en órbita geoestacionaria sobre el Atlántico en 1976. (Un satélite en órbita geoestacionaria gira alrededor de la tierra cada 24 horas, y por tanto permanece estacionario sobre un punto de la superficie de la misma.) Cada uno de los Intelsat IV-A tiene capacidad para 6000 circuitos telefónicos y dos canales de televisión. En funcionamiento sobre el Atlántico se encuentran también un Intelsat IV y el de reserva, ambos con capacidad para 4000 circuitos telefónicos y dos canales de televisión. El armazón de los Intelsat IV-A está recubierto por 16.852 células de silicio, que generan 500 vatios.

comunicaciones entre Norteamérica y Europa.

En la década siguiente, los satélites han cambiado el esquema y ritmo de las comunicaciones mundiales. Se han convertido en el bien de consumo más práctico de los proporcionados por la tecnología espacial, al ofrecer servicios de telefonía, televisión y transmisión de datos de alta calidad, fiables y económicos. Además del sistema intercontinental Intelsat, existen otros sistemas nacionales actualmente en funcionamiento en varios países, así como un sistema marítimo destinado a dar servicio vía satélite a barcos en alta mar. Se está preparando sistemas para aplicaciones especiales, tales como los de comunicaciones aeronaúticas y empresariales. Describiremos algunos de los sistemas, pero antes analizaremos con cierto detalle el sistema Intelsat, su tecnología, características y fiabilidad, la relación eficacia-coste y los acuerdos tomados que hicieron que todo ello pudiera llevarse a la práctica. Nos ocuparemos, en primer lugar, de las repetidoras en el espacio.

Los satélites de comunicación son estaciones repetidoras de radio en el espacio que hacen prácticamente las mismas funciones que las torres de los radioenlaces de microondas que pueden verse en las autopistas. Los satélites reciben desde tierra señales de radio muy débiles, las amplifican, las trasladan en frecuencia y las retransmiten a la tierra.

Puesto que los satélites se encuentran a gran altitud, pueden "ver" desde su posición la mitad de la tierra. Esto les proporciona la principal ventaja para las comunicaciones: insensibilidad a la distancia. Otra importante ventaja es que



LA RED INTERCONTINENTAL DE INTELSAT consta de ocho satélites, dispuestos en tres grupos, situados a 35.000 km sobre el Atlántico, el Pacífico y el Indico, que hacen las funciones de estaciones repetidoras de señales de radio de ida y vuelta para 150 estaciones terrestres de 80 países. Los Intelsat IV que aún cursan todo el servicio del Pacífico e Indico, tienen dos antenas de bocina emisoras y receptoras que cubren toda la tierra visible desde el satélite. Cada Intelsat IV dispone de dos haces de transmisión dirigibles que les proporcionan ganancia adicional y, por ello, mayor potencia en ciertas zonas geográficas. Los Intelsat IV-A, de mayor tamaño y capacidad, tienen haces separados, que suplementan a los intercontinentales, y cubren Europa y Africa en el Hemisferio Oriental y América del Norte

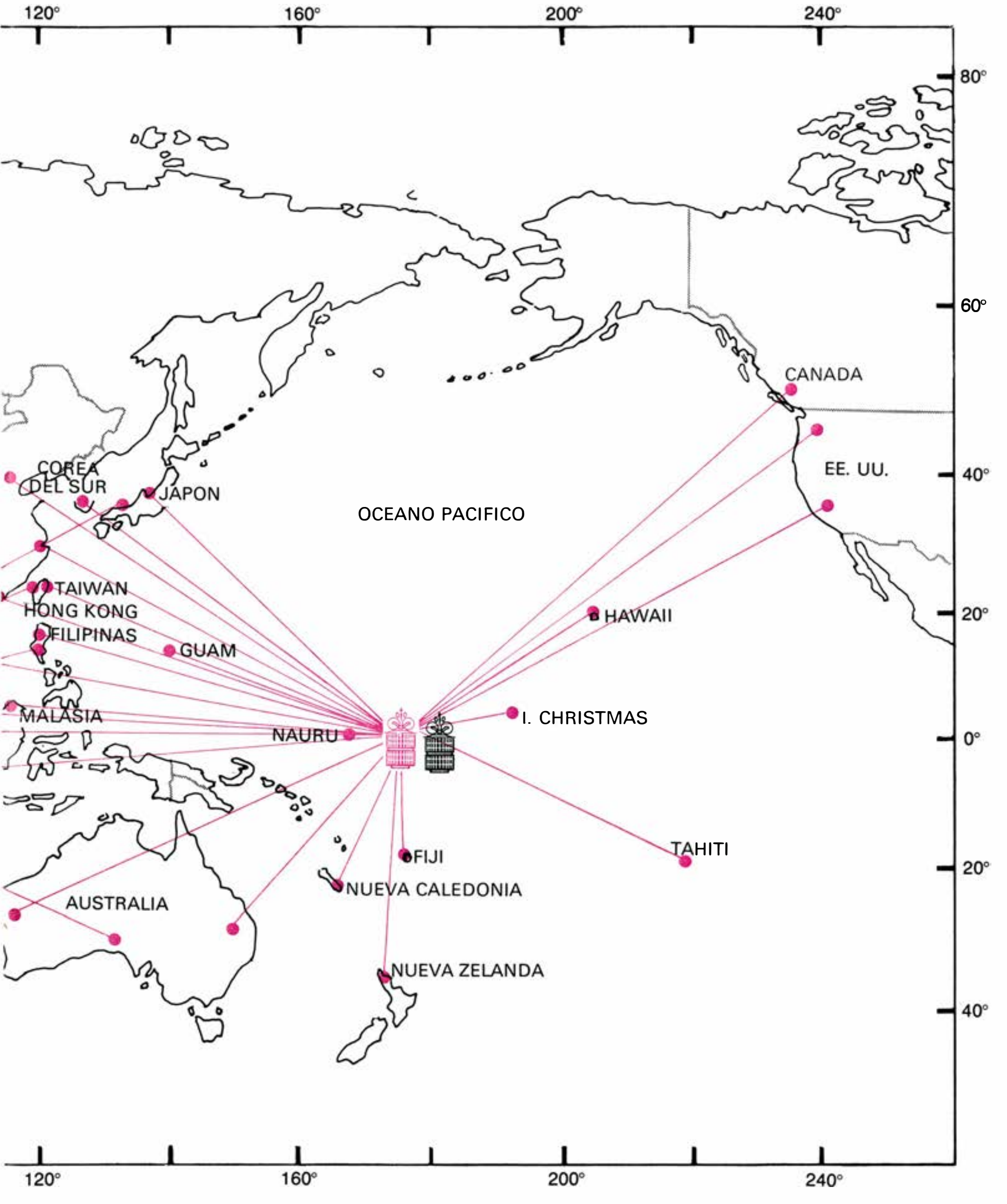
pueden ver todos los transmisores y receptores de microondas (estaciones terrestres) de un tercio de la tierra, aproximadamente. De esta forma, pueden enlazar dos estaciones cualesquiera u ofrecer servicios de punto a multipunto, como es el caso de la televisión. Los enlaces por tierra, entre los que pueden citarse los radioenlaces de microondas y los cables, están por naturaleza limitados a servicios de punto aislado a punto aislado.

Todos los satélites Intelsat actúan en órbitas ecuatoriales síncronas, lo que hace posible que tanto la transmisión como la recepción se produzcan de forma ininterrumpida con un seguimiento mínimo por parte de las estaciones terrestres. Los satélites reciben las señales transmitidas desde tierra a frecuencias de la banda de seis gigahertzios (seis mil millones de ciclos por segundo) y las retransmiten a tierra a frecuencias de la banda de cuatro gigahertzios. Todos los satélites Intelsat lanzados hasta el momento han sido giroscópicamente estabilizados; así mantienen su orientación en el espacio mediante la rotación del cuerpo del satélite según un eje paralelo al eje de la tierra. Su alimentación se ha realizado a base de células solares de silicio montadas en el cuerpo de giro.

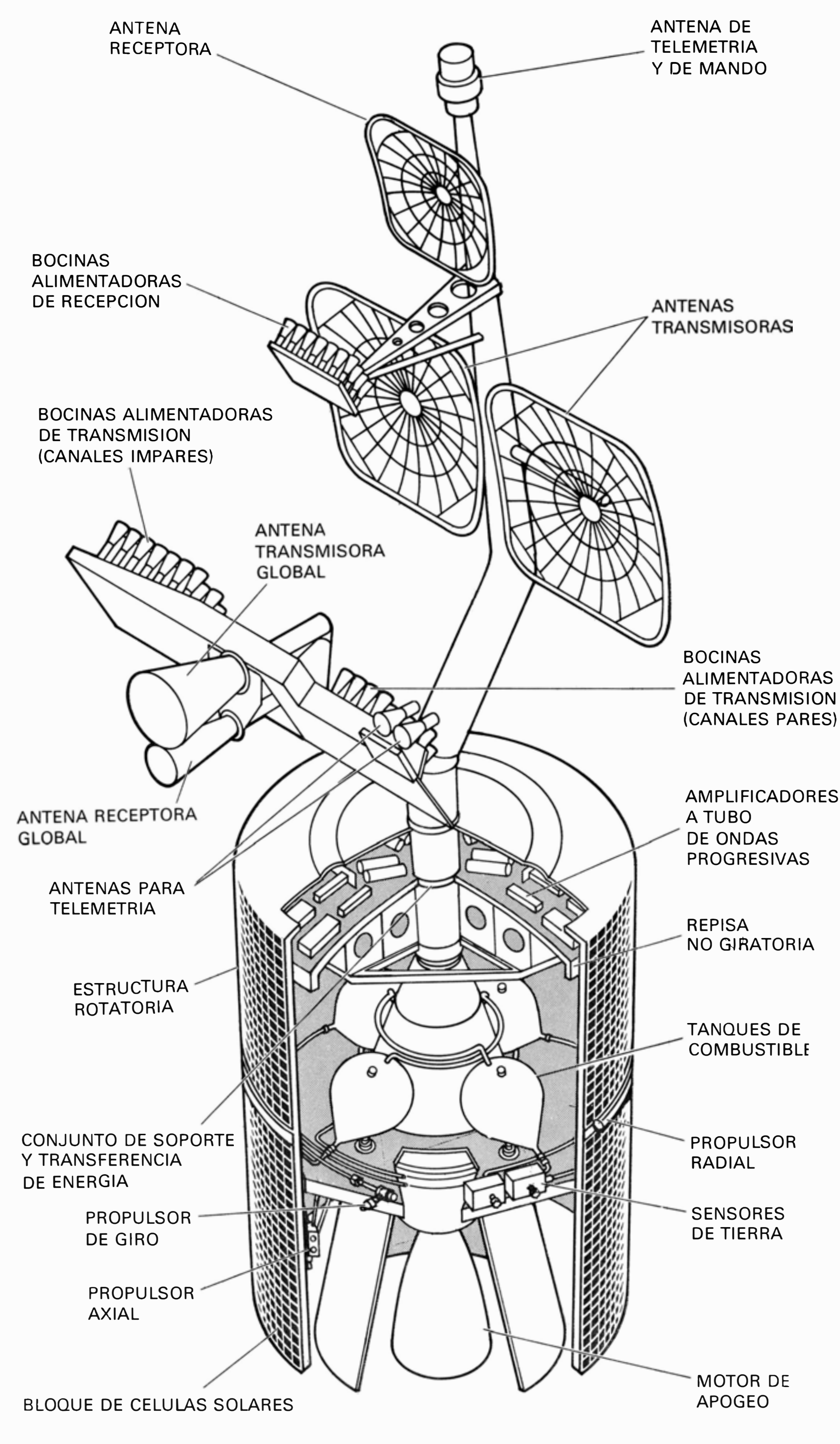
El cuerpo del satélite sirve de alojamiento de la carga útil de equipos de comunicación, que no están sometidos a rotación, a fin de que mantengan su orientación con respecto a la tierra. La citada carga útil comprende los receptores, amplificadores, transmisores y antenas. En la estructura exterior de rotación se halla el sistema de alimentación eléctrica, el sistema de estabilización (incluidos los depósitos de combustible) y un motor para combustible sólido, encargado de dar el impulso necesario en el apogeo de la órbita de transferencia del satélite para colocarlo en una órbita ecuatorial con inclinación prácticamente cero. El motor de apogeo y su propulsor pesan aproximadamente lo mismo que el resto de los componentes del satélite en conjunto.

El sistema de estabilización determina la dirección de la tierra mediante unos sensores infrarrojos y utiliza unos pequeños propulsores para alinear convenientemente el eje de giro del satélite y mantener los haces de las antenas orientados hacia tierra. Para mantenerlo en órbita, es necesario reducir al mínimo la tendencia a la deriva del satélite según su órbita, debido a las perturbaciones gravitatorias provocadas por el achatamiento de los polos de la tierra. En este aspecto, las estaciones terrestres se encargan de seguir adecuadamente al satélite, calculando el vector de propulsión necesario para compensar la deriva, y de arrancar mediante una señal de radio los propulsores adecuados. Estos propulsores alimentados por hidracina generan la fuerza impulsora necesaria para ajustar la posición del satélite. Con ellos, el sistema de estabilización puede controlar la disposición del eje de giro, desplazar al satélite en dirección este-oeste y contrarrestar la influencia gravitatoria del sol y la luna, que tiende a aumentar la inclinación del satélite. La corrección de la inclinación consume una importante parte de la hidracina, por lo que tal hecho está íntimamente relacionado con la vida útil prevista para el satélite.

Es igualmente necesario vigilar el estado de los diferentes sistemas y dispositivos del satélite y adoptar las medidas correctoras en caso de mal funcionamiento. Esto se lleva a cabo mediante telemetría soportada en una serie de sensores que detectan temperaturas, tensiones eléctricas y otros parámetros, para transmitirlos después a estaciones terrestres especiales por medio de un ra-



y del Sur en el Hemisferio Occidental. En el grabado, los satélites en funcionamiento están representados en color; los de reserva, en gris. Uno de los Intelsat IV-A de la zona del Atlántico que actúa como vía primaria conecta a pequeños y grandes usuarios y lleva parte del voluminoso tráfico de los últimos. Un Intelsat IV, la vía principal, cursa el resto del tráfico de los grandes usuarios. Cada satélite dispone de tubos transmisores de reserva para transmisión en los casos de avería parcial. Cuando se producen averías totales, rápidamente entran en servicio los satélites de reserva.



IDENTIFICACION DE LOS COMPONENTES más importantes del Intelsat IV-A. El eje del satélite se mantiene paralelo al de la tierra mediante la rotación de la estructura exterior que gira a más de 50 revoluciones por minuto. Un inconveniente de esta forma de estabilización es que, en un momento dado, sólo se encuentran a la luz del sol menos de la mitad de las células solares. El mástil de la antena y el resto de los dispositivos de comunicación no son sometidos a giro; en consecuencia, están orientados de forma fija a la tierra. Ello se consigue mediante un pequeño motor eléctrico colocado en el conjunto de soporte y transferencia de energía. La hidracina se emplea como combustible de los reactores que controlan la orientación del satélite en tres ejes (balanceo, cabezada y guiñada) y lo mantienen en la posición orbital deseada. Las señales para mantener el satélite dentro del margen de 0,1 grado (60 km) de su estación asignada, se envían por radio desde tierra cuando es necesario, normalmente una vez al mes. El abastecimiento de carburante es una de las más importantes limitaciones de la vida útil de satélite. El motor de apogeo solamente se utiliza en una ocasión, en el lanzamiento, para dar al satélite el impulso final que le hace pasar del apogeo de su órbita de transferencia a la órbita ecuatorial circular. La próxima generación de satélites Intelsat dispondrá de un armazón estabilizado por ruedas reactoras internas, con células solares en paneles en forma de alas, con un giro diario y siempre orientadas al sol.

dioenlace. Esta información, una vez procesada, se envía luego al centro de control para su evaluación y visualización. En caso de detectarse situaciones anormales en el satélite, éstas pueden corregirse por radio, desde las mismas estaciones terrestres.

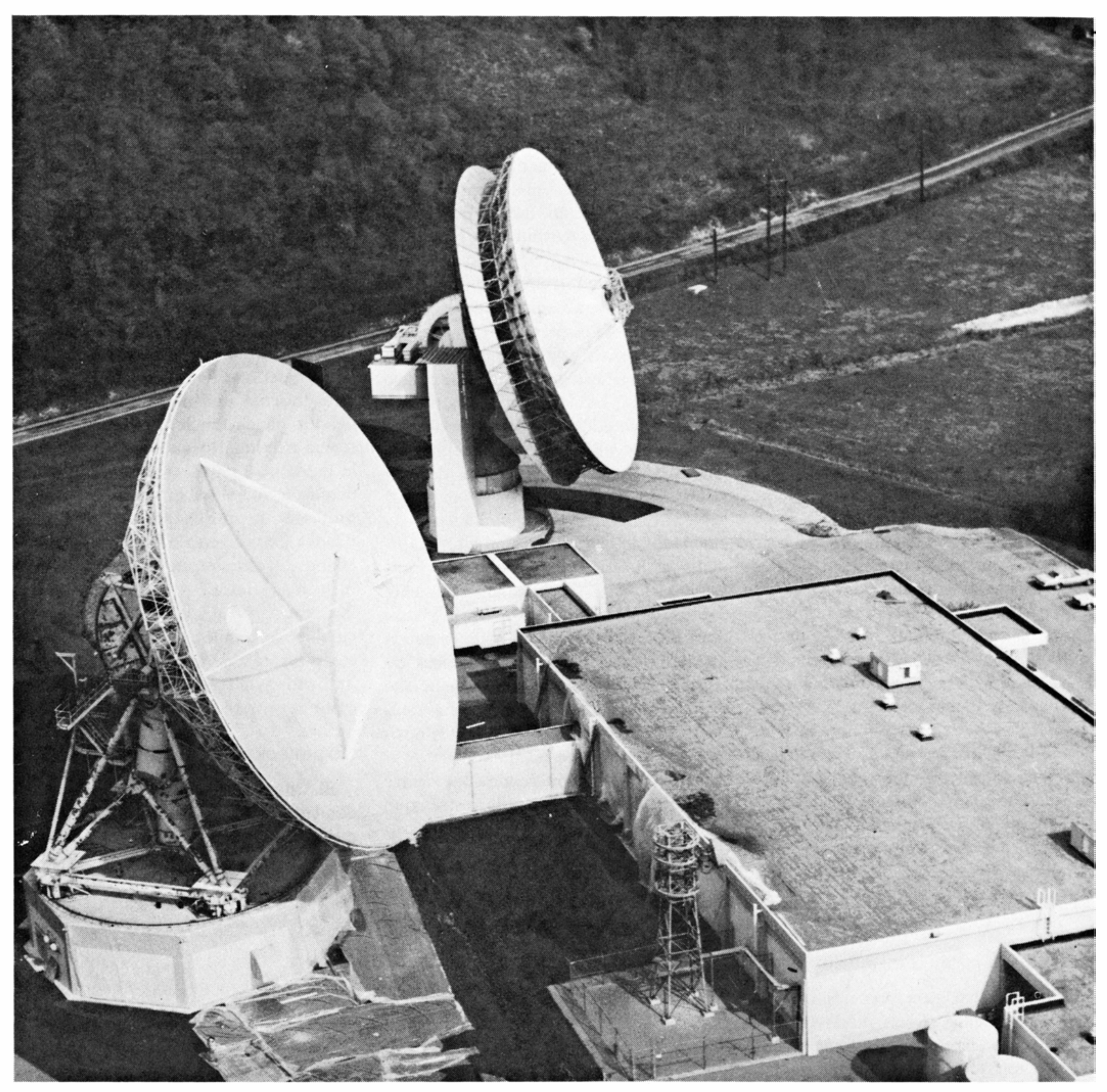
En la década que transcurrió desde 1965 a 1975, la tecnología del sistema Intelsat experimentó progresos importantes. La eficacia de un satélite destinado a las comunicaciones no se mide solamente por su duración, sino también por su capacidad que, a su vez, depende de la potencia radiada y de la anchura de banda. A medida que, en ese último decenio, se desarrollaba la tecnología, los satélites Intelsat fueron mejorando en duración, potencia y anchura de banda.

La disponibilidad de vehículos de lanzamiento más potentes hizo posible colocar en órbita satélites mayores, proporcionando de esta forma una superficie mayor para las células solares y, en consecuencia, más potencia eléctrica para la transmisión por radio. Gracias al aumento de potencia y al diseño más depurado de los transpondedores se usó una mayor parte de la anchura de banda asignada. La adopción de componentes, dispositivos y diseños más avanzados, junto con las técnicas más eficaces y de mayor calidad, han contribuido a la mejora en la fiabilidad y vida útil de los satélites.

El *Intelsat I,* con capacidad para 240 circuitos telefónicos, pesaba 38 kg. La última generación de satélites, entre los que se encuentra el *Intelsat IV-A,* miden 5,9 m de altura, pesan 790 kg y tienen una capacidad para manejar simultáneamente 6000 circuitos telefónicos. (La palabra circuito implica una conexión doble para conversaciones bidireccionales y necesita, por ello, dos canales telefónicos de una vía.) Además, en esa década, la vida del satélite en órbita ha pasado a ser de 1,5 a 7 años. Como consecuencia de estas mejoras, el coste de inversión por circuito y año en órbita del *Intelsat IV-A* es solamente de 1100 dólares, que debe compararse con los 32.500 que costó el *Intelsat I.*

Estaciones terrestres

Una estación terrestre transmite potentes señales de radio al satélite, recibiéndolas muy atenuadas de éste. En el sistema Intelsat, las estaciones terrestres sirven también para conectar la red intercontinental de satélites a la red terrestre de comunicaciones de los diferentes países, lo cual suele hacerse mediante enlaces de microondas. La estación terrestre ha de reorganizar las diferentes



LA ESTACION TERRESTRE de Etam, en un valle "tranquilo" en cuanto a radioemisiones, en West Virginia, es la principal instalación de los Estados Unidos para repetir señales vía satélite a través del Atlántico. Es la estación terrestre de mayor tráfico en la red global de Intelsat. Etam cursa más de 1000 circuitos telefónicos a unos 40 lugares de Europa, Africa, Oriente Medio y América Latina. Otra estación de tamaño semejante, la de Andover, en Maine, despacha el resto del tráfico atlántico y sirve de respaldo para Etam. Las dos grandes antenas parabólicas de Etam tienen unos 30 metros de diámetro. Comsat y otras cuatro compañías estadounidenses son copropietarias de la estación.

señales de entrada procedentes de las redes terrestres destinadas a comunicaciones vocales, de TV y de datos en grupos adecuados para su transmisión por satélite. Cada uno de estos grupos modula una onda portadora de radiofrecuencia que se encuentra en la banda de los seis gigahertzios. Un amplificador capaz de producir hasta 12 kilovatios consigue la potencia necesaria para transmitir la señal al satélite. De aquí que una señal normal de entrada sea amplificada unas 320.000 veces, antes de ser enviada a una antena parabólica de treinta metros de diámetro. La función de esta antena es concentrar la energía radiada en un haz estrecho dirigido al satélite. Si la energía que se envía desde la estación, en vez de ser concentrada en un haz, fuese irradiada en todas las direcciones, se necesitaría 630 megavatios para la transmisión en lugar de los cientos de vatios que realmente se transmiten. Se hace referencia al valor de 630 megavatios como la potencia equivalente irradiada isotrópicamente.

Tras haber recorrido 35.800 km por el espacio, la señal que el satélite recibe tiene una potencia de sólo siete picovatios (7×10^{-12} vatios). El satélite amplifica esta pequeña señal, la traslada a una frecuencia de la banda de cuatro gigahertzios, la eleva a una potencia equivalente isotrópicamente irradiada de 500 vatios y la retransmite a la tierra. Una vez en la estación terrestre, la antena parabólica recibe tres escasos picovatios de energía con los que alimenta a un receptor de bajo ruido. Allí se amplifica a un milivatio, más o menos, que es el nivel suficiente para atacar la red de distribución local. En lo que una señal demora

en llegar a una estación terrestre, ir a un satélite Intelsat y volver a otra estación terrestre diferente, se la amplifica por un factor de aproximadamente 10^{40}, que equivale a 400 decibelios.

Las mejoras conseguidas en la tecnología de las estaciones terrestres y en la de los satélites son casi las mismas, pero aquéllas tienden a tener menos resonancia debido, quizá, a que se introducen de forma rutinaria en la estación, en un momento dado, y no son lanzadas por ningún cohete. Por ejemplo, en la última década, los amplificadores Klistron de banda estrecha, utilizados en los transmisores de las estaciones terrestres, dieron paso a los de tubo de onda progresiva de banda ancha. En el mismo período, los receptores máser fueron sustituidos por amplificadores paramétricos de bajo ruido. Los reflectores de antena, los alimentadores y los mecanismos de seguimiento han sido simplificados y mejorados en sus características funcionales. El mayor adelanto conseguido en la tecnología de las estaciones terrestres quizá sea su fiabilidad. La vida de los equipos se ha ampliado de decenas a miles de horas, debido al cuidado diseño y al uso de componentes ultrafiables. Los períodos ocasionales en que la estación terrestre queda fuera de servicio han sido reducidos a segundos por la utilización de equipos redundantes y unidades de conmutación automática de reserva. El futuro de las estaciones terrestres no atendidas parece estar asegurado para ciertos usos.

Sistemas de transmisión

Una señal que, generada en un punto de la tierra, viaja a una estación terrestre, luego a un satélite, después a una segunda estación terrestre para alcanzar su destino en otro punto de la tierra, se procesa en diferentes etapas. El paso inicial consiste en multiplar o combinar las señales entrantes de varios tipos, de forma que puedan modular una única portadora de banda ancha de seis gigahertzios que se amplifica y se envía al satélite. En la estación receptora terrestre, el proceso se produce a la inversa, es decir, la señal se somete a amplificación, traslación de alta a baja frecuencia, demodulación, demultiplación y procesamiento para su transmisión en tierra.

Veamos lo que ocurre cuando en la pantalla de televisión vemos las palabras "en directo vía satélite". Desde su punto de origen se transmite la señal de televisión por cable coaxial y radioenlace de microondas a una estación terrestre del sistema Intelsat a través de las redes terrestres. En la estación terrestre transmisora, la señal modula una portadora de radiofrecuencia que se encuentra en la banda de seis gigahertzios. Aun cuando la anchura de banda de la señal de televisión es, normalmente, de sólo cinco megahertzios, una señal modulada en frecuencia con gran índice de desviación, y con una anchura de banda de tres a seis veces mayor, la transmite al satélite. La modulación de frecuencia mejora considerablemente la relación señal-ruido, conservándose la potencia del satélite. Este amplifica la señal y la retransmite a tierra en la banda de cuatro gigahertzios. La estación terrestre amplifica y demodula la portadora de televisión y la envía, a través de una red terrestre, a una estación local de televisión, donde se emite o se envía por cable a los receptores individuales. Frecuentemente, en acontecimientos informativos, juegos olímpicos y otros programas de interés mundial, el satélite emite a todo el mundo una sola portadora de televisión, de tal manera que la puedan recibir todas las estaciones terrestres. Tratándose de acontecimientos de interés mundial, son varios los satélites que, colocados en diferentes posiciones, transmiten la señal.

Para establecer interconexiones entre las numerosas estaciones terrestres que utilizan el mismo satélite, es necesario emplear una técnica que permita al satélite recibir y transmitir un gran número de portadoras de radiofrecuencia. En el sistema Intelsat, esto se ha logrado mediante el uso de la técnica de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA). Las portadoras, moduladas en frecuencia, que llevan un solo canal de televisión o varios canales de voz y datos se transmiten en frecuencias asignadas, bien separadas para evitar la interferencia entre portadoras *(véase la ilustración superior de la pág. 52)*. A cada portadora se le asigna una anchura de banda y una potencia adecuadas al tipo de información modulada. En beneficio de un mayor aprovechamiento en el uso tanto del espectro como de los equipos suelen emplearse portadoras con destino múltiple. Es decir, el tráfico dirigido a varias estaciones terrestres se transmite por la misma portadora. En consecuencia, las estaciones terrestres tienen un conjunto de equipos receptores para cada uno de los puntos distantes con los que han de establecer comunicación. Sin embargo, pueden utilizar un solo conjunto de equipos transmisores para varios destinos.

La técnica numérica conocida como acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA), cuya capacidad y flexibilidad son superiores a las que ofrece la modalidad por división de frecuencia, constituye otra posibilidad además del acceso múltiple por división de frecuencia. En los sistemas con división en el tiempo, son varias las estaciones terrestres que trabajan con el mismo repetidor del satélite, transmitiendo sus señales en ráfagas cortas, temporizadas con precisión, de forma que llegan secuencialmente al satélite. Una de las ventajas que ofrece la modalidad por división en el tiempo es que, en un momento dado, en el amplificador del satélite sólo es necesario que esté presente una portadora. El amplificador puede funcionar entonces a potencia máxima, lo que no es posible en la modalidad por división de frecuencia, debido a que al haber varias portadoras presentes, las no linealidades del amplificador dan origen a ruido de intermodulación. La división en el tiempo es también más flexible que la división de frecuencia, ya que es más fácil y rápido cambiar la temporización y el intervalo entre las ráfagas que variar la anchura de banda y la frecuencia asignadas a los equipos de transmisión y recepción.

Explotación y aspectos económicos

El sistema Intelsat se desarrolló rápidamente en la última década. En su primer año de existencia, en 1965, estaban ya en servicio, en la zona del Atlántico, un

AÑO DEL PRIMER LANZAMIENTO
ALTURA (CENTIMETROS)
MASA EN ORBITA (KILOGRAMOS)
VEHICULO DE LANZAMIENTO
POTENCIA PRIMARIA (WATIOS)
ANCHURA DE BANDA (MEGAHERTZIOS)
CAPACIDAD (CIRCUITOS TELEFONICOS)
DURACION PREVISTA (AÑOS)
INVERSION POR CIRCUITO Y AÑO

CUATRO GENERACIONES de satélites, amén de una importante modificación, entraron en servicio en la década de 1965-1975. La quinta vendrá en 1979. A medida que los satélites van siendo mayores, más pesados y potentes,

satélite y cinco estaciones terrestres, dotadas de capacidad para 65 circuitos bidireccionales. Dado que este satélite no disponía de acceso múltiple, solamente podía atender un enlace, es decir, únicamente era posible conectar dos estaciones, de las cuales una se encontrase en Norteamérica y la otra en Europa. Las estaciones terrestres de Alemania, Francia y Gran Bretaña se turnaban por semanas para distribuir el tráfico del satélite a Europa. A una italiana se le asignó el tráfico de fin de semana. En la actualidad, los satélites disponen de acceso múltiple, lo que hace posible que todas las estaciones puedan funcionar simultáneamente.

En estos momentos, cuatro satélites Intelsat –dos en funcionamiento y dos en reserva– cubren la zona del Atlántico; dos –uno en funcionamiento y otro en reserva– lo hacen en la del Pacífico, y, finalmente, otros dos –uno en funcionamiento y otro en reserva– en la del Indico. Todos ellos hacen posible una red mundial de comunicaciones que cursa tráfico mediante 400 enlaces que conectan entre sí 150 estaciones terrestres pertenecientes a 80 países. La red Intelsat, además de atender a 7700 circuitos telefónicos de asignación permanente, ofrece el equivalente a varios miles de circuitos para televisión y transmisión de datos. En los últimos años, tanto el número de estaciones terrestres como el de circuitos disponibles ha superado la duplicación. Sin duda, gran parte de este desarrollo es el resultado de la introducción de servicios fiables de comunicación en regiones nuevas en las cuales anteriormente el servicio era escaso o inexistente.

La fiabilidad de las comunicaciones mundiales por satélite es ahora algo imponente. A principios de la década de 1960, esperábamos que los satélites tendrían una duración operativa de dos años. Sin embargo, con la entrada en servicio de la serie *Intelsat IV*, nos inclinamos a pensar que su vida en servicio puede alcanzar los siete años. Por su parte, las estaciones terrestres del sistema alcanzan rutinariamente un porcentaje de fiabilidad del 99,99 (un tiempo fuera de servicio inferior a una hora por año), con lo que la continuidad del servicio para el sistema mundial en su totalidad es superior al 99,9 por ciento.

A lo largo de la década a que nos estamos refiriendo, el sistema Intelsat ha logrado ventajas económicas determinadas por el perfeccionamiento de la tecnología y por economías de escala. Aun cuando el coste de fabricación y lanzamiento de los satélites ha aumentado con el tiempo, la tecnología ha compensado, con creces, la inflación de costes, ofreciendo más altas capacidades de comunicación mediante unos tiempos de vida útil más prolongados y un uso más eficaz de la potencia y de la anchura de banda. A medida que se ha ido colocando satélites en órbita, los gastos fijos de explotación del sistema han representado una fracción decreciente de la inversión y, puesto que el sistema lleva un volumen de tráfico en continuo aumento, cada vez hay más circuitos para compensar los gastos generales. De esta forma, es probable que el coste por circuito y año disminuya. De hecho la tarifa que los usuarios del sistema han tenido que abonar en 1976 representa la cuarta parte de la que abonaban en 1965, a pesar del 100 por ciento de aumento experimentado en el coste de la mayoría de los demás artículos y servicios, a causa de la inflación.

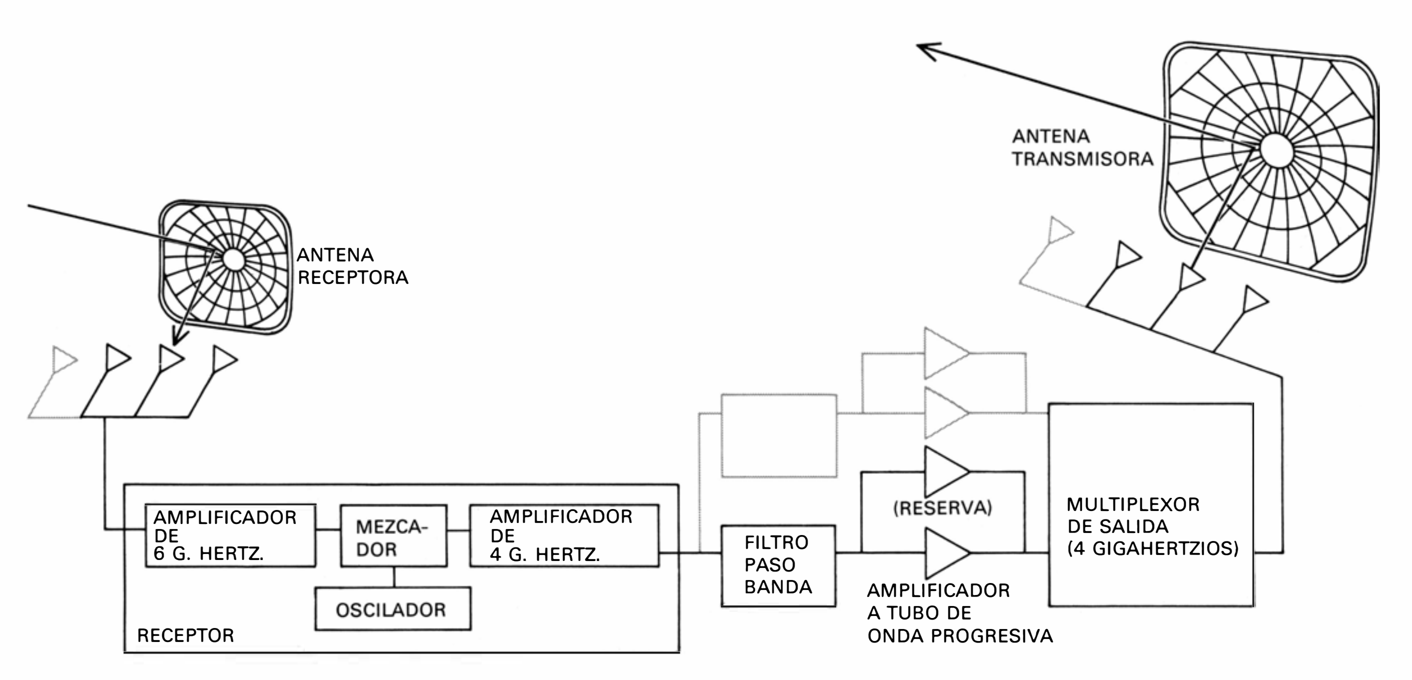
Como ya he dicho, los ingresos sobrepasan, en la actualidad, los 140 millones de dólares por año. No obstante, el total de ingresos percibido en el tráfico que se envía por satélite es una cifra que nadie calcula por ser muy elevada y que ahora, sin duda, excede de mil millones de dólares por año. A los países miembros, Intelsat les paga un 14 por ciento sobre su inversión. Ello, más los beneficios de explotación de las estaciones terrestres, hace posible que las administraciones de telecomunicación de la mayoría de los países funcionen con claros beneficios. El sistema global parece rentable en todos sus aspectos.

Disposiciones internacionales

Uno de los aspectos que más salta a la vista en la organización Intelsat es el dispositivo internacional que la hace posible. No deja de ser una proeza el unir 95 naciones en una empresa pacífica y

INTELSAT I	INTELSAT II	INTELSAT III	INTELSAT IV	INTELSAT IV-A	INTELSAT V
1965	1967	1968	1971	1975	1979
59.6	67.3	104	528	590	1,570
38	86	152	700	790	967
THOR-DELTA	THOR-DELTA	THOR-DELTA	ATLAS-CENTAUR	ATLAS-CENTAUR	ATLAS-CENTAUR
40	75	120	400	500	1,200
50	130	500	500	800	2,300
240	240	1,200	4,000	6,000	12,000
1.5	3	5	7	7	7
$32,500	$11,400	$2,000	$1,200	$1,100	$800

necesitan mejores vehículos de lanzamiento. La capacidad de los satélites ha pasado de los 240 circuitos telefónicos del *Intelsat I (Pájaro del Alba)* a los 6000 del Intelsat IV-A y, de aquí, a los 12.000 que se calculan para el Intelsat V. Todo el *Intelsat I*, incluida la antena, se hacía girar sobre su eje para estabilizarlo. El Intelsat III fue el primero de la serie en el que la antena no se hizo girar para orientarla hacia la tierra. Los de la serie V dispondrán de un armazón estabilizado y fijo en el espacio, según tres ejes. Aunque el costo de los satélites y de los vehículos de lanzamiento ha ido aumentando constantemente, el costo por circuito y año ha disminuido; es ahora menos del 5 % del inicial.



EL SISTEMA DE COMUNICACIONES DEL INTELSAT IV-A lleva 20 transpondedores o canales de radiofrecuencia separados. Cada uno de éstos tiene una anchura de banda de 36 megahertzios, suficientes para dar cabida a dos canales de televisión y 600 circuitos telefónicos bidireccionales. En el grabado, se muestra el enlace a través de un transpondedor. La antena receptora del satélite toma la señal de tierra y la envía a un receptor, que la amplifica y la traslada de seis a cuatro gigahertzios, para su retransmisión a tierra. Los filtros paso banda hacen que las frecuencias de los 20 transpondedores se mantengan separadas unas de otras. La señal, amplificada por un tubo de ondas progresivas, pasa a uno de los multiplexores de salida, donde se combinan las señales de los transpondedores para su envío a la antena adecuada.

MODULACION DE LA SEÑAL Y TRANSLACION A LA FRECUENCIA PORTADORA
GENERADOR
FILTROS
BATERIAS DE EMERGENCIA
MEZCLADORES
CENTRO DE CONTROL DE LA ESTACION
REFLECTOR PRINCIPAL
SUBREFLECTOR
HAZ HACIA Y DESDE EL SATELITE
GUIAONDA
OPTICA PLEGADA DE RADIOFRE-CUENCIA
MULTIPLEXOR
UNIDAD DE CONFORMACION DE SEÑAL
DEMODULACION PARA FORMACION DE GRUPOS DE SUBPORTADORA
ENLACE DE MICROONDAS (ENTRANTE Y SALIENTE)
BOCINA ALIMENTADORA DE TRANSMISION
AMPLIFICADOR DE ALTA POTENCIA
AMPLIFICADOR EXCITADOR
ENLACE DE MICROONDAS
ALIMENTADOR DE RECEPCION Y FILTRO
AMPLIFICADOR DE BAJO RUIDO

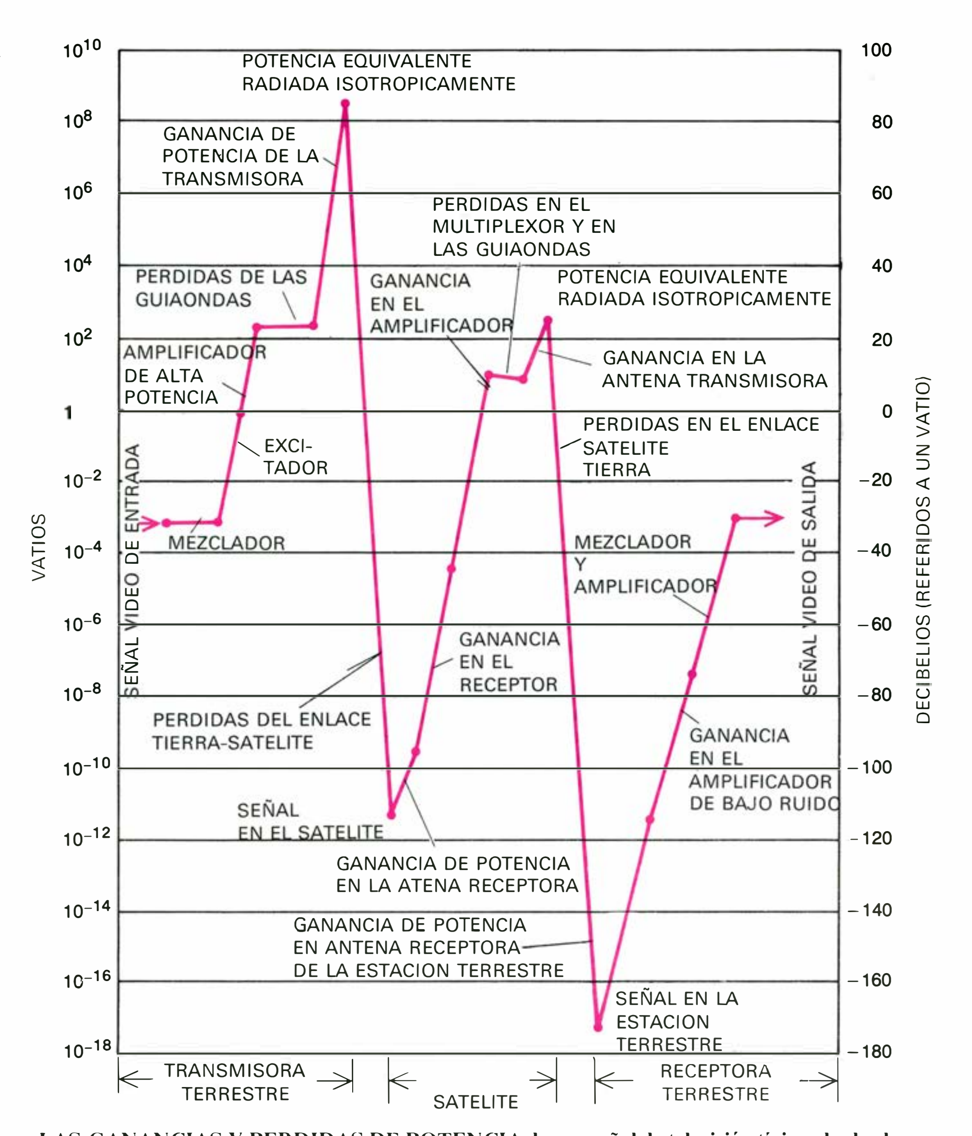
EL PROCESAMIENTO DE UNA SEÑAL en las estaciones terrestres es, por necesidad, más complejo que el que se realiza a bordo de un satélite de telecomunicación. Los diferentes tipos de señal (a saber, voz, televisión, datos, etcétera) que provienen de las redes terrestres deben ser separados y reagrupados en un formato que sea adecuado para la transmisión por satélite. Las señales, agrupadas según sus destinos, son moduladas y trasladadas a la frecuencia portadora que se asigna a cada uno de los destinos. Esta mezcla da lugar a portadoras cuyas frecuencias se encuentran entre 5925 y 6425 gigahertzios. Un multiplexor se encarga de combinar las portadoras y enviarlas, mediante un guiaondas, al amplificador excitador y al de alta potencia. La señal, muy amplificada, pasa, a través de la bocina de alimentación transmisora, al reflector principal, el cual enfoca la energía en un haz dirigido al satélite en órbita a 35.800 km de distancia. Las señales recibidas del satélite son recogidas por el mismo reflector que se utiliza para transmitir, pasando por una serie de etapas de procesamiento que son inversas a las de preparación de la señal de salida. La localización de averías, el seguimiento y la comprobación se hacen desde el centro de control.

sensata y hacerlas trabajar de manera cooperativa y rentable. Estas naciones, por orden alfabético, van desde Afganistán a Zambia, y en ellas están englobadas prácticamente todas las razas, religiones y sistemas económicos. La representación de la mayoría de estos países en Intelsat corre a cargo de administraciones gubernamentales; algunos, no obstante, están representados por organizaciones privadas, tal es el caso de Comsat en Estados Unidos. Otros, la URSS, por ejemplo, aun cuando no son miembros de Intelsat, utilizan con regularidad sus servicios. El hecho de que el sistema funcione convenientemente a pesar de la dispersión geográfica y las divergencias políticas de sus miembros, es un claro testimonio de la universalidad de la tecnología.

Ahora que la red Intelsat es un sistema operativo ya maduro, puede que el crecimiento de los enlaces de comunicación existentes alcance un promedio anual del 15 al 20 por ciento. Se introducirán nuevas tecnologías para conseguir mayor capacidad, eficacia y fiabilidad en los servicios, pero los días del desarrollo explosivo del sistema ya han quedado probablemente atrás. Sus principales preocupaciones deben ser ahora mantener unas operaciones fiables y una continuidad de servicio. Al igual que en todos los sistemas en funcionamiento, las decisiones sobre la introducción de nueva tecnología para satisfacer las necesidades de crecimiento deben conseguir un equilibrio entre las nuevas posibilidades y la amortización de la inversión en instalaciones existentes.

Para 1978, Intelsat prevé la puesta en servicio de una nueva serie de satélites, los *Intelsat V*. De ser así, este hecho ocurriría ocho años después de la introducción de la serie *Intelsat IV*, mientras que en los primeros seis años de existencia del sistema fueron tres las generaciones de satélites introducidas. El *Intelsat V* tendrá capacidad para 12.000 circuitos, tres veces más que el *Intelsat IV*, y dos más que el *Intelsat IV-A*. Este nuevo satélite se ha proyectado también para conseguir una utilización más eficaz de las bandas de frecuencia de seis y cuatro gigahertzios por discriminación de polarización. Cada banda llevará dos conjuntos de señales circularmente polarizadas, uno en sentido dextrógiro y otro en sentido levógiro, proporcionando así un doble uso de frecuencias en cada zona geográfica.

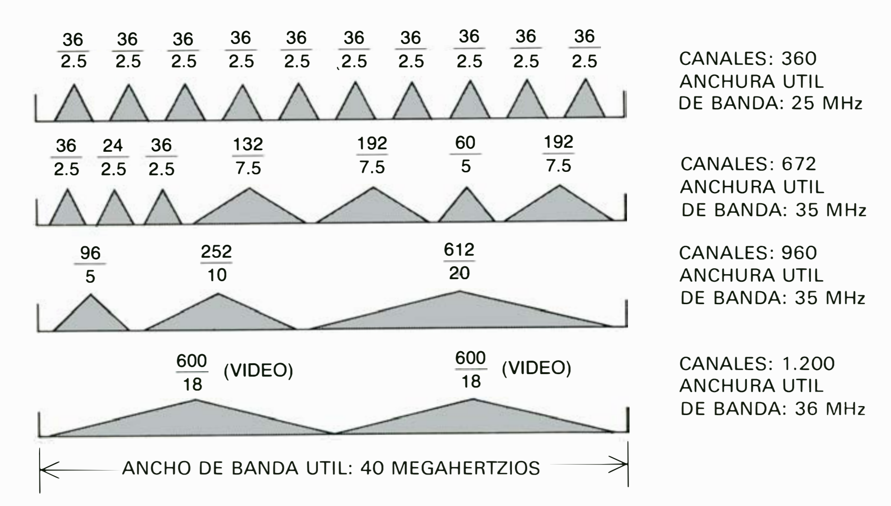
El *Intelsat V* inaugurará igualmente una nueva banda de frecuencias: de tierra al satélite en la región de 14 gigahertzios y, del satélite a tierra, en la de 11



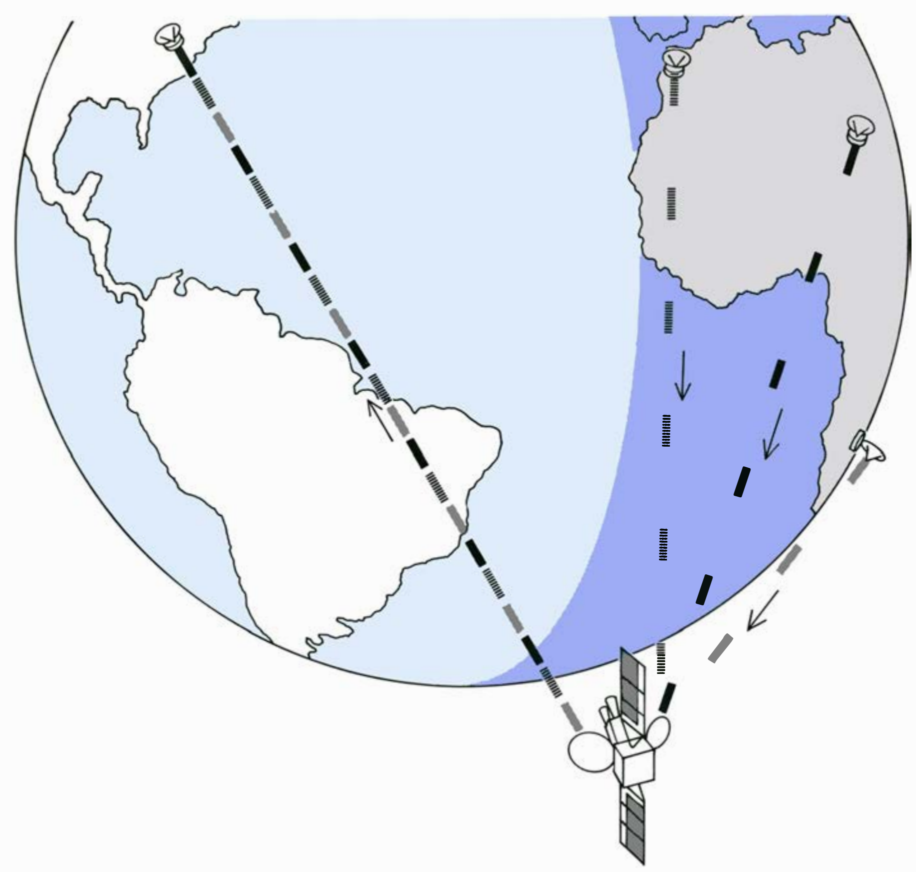
LAS GANANCIAS Y PERDIDAS DE POTENCIA de una señal de televisión típica, desde el momento que llega a una estación terrestre, pasa al satélite y, finalmente, va a otra estación, cubren un espectro dinámico que abarca desde menos de 10^{-17} vatios al equivalente efectivo de casi 10^{9} vatios o un gigavatio. Convertidos en decibelios relativos a un vatio, el margen se amplia de casi –170 decibelios a más de 80. Desde luego, las mayores pérdidas se producen en el enlace de 35.800 km que va de la tierra al satélite. Las ganancias más importantes se producen en las antenas de 30 metros de las estaciones. El gran reflector de la estación terrestre consigue una ganancia, sobre la señal saliente amplificada, de aproximadamente un millón, pasando de unos cuantos centenares de vatios a una potencia equivalente radiada isotrópicamente de varios centenares de megavatios, que representa la potencia necesaria en la estación terrestre si la señal se radiara en todas las direcciones en vez de ser enfocada. En la estación terrestre distante, otro reflector recibe la débil señal de cuatro gigahertzios procedente del satélite y le proporciona una nueva ganancia de casi un millón.

gigahertzios. Cada una de estas regiones de frecuencia proporciona una anchura de banda de 500 megahertzios. Utilizando, sin embargo, dos haces separados en el espacio, la anchura eficaz de banda llegaría a ser hasta de 1000 megahertzios. En consecuencia, la adición de la polarización circular aumentará la anchura total de banda en el equivalente de unos 2300 megahertzios.

Hasta hace poco, Intelsat exigía que en todas sus estaciones terrestres se empleasen reflectores de aproximadamente 30 metros, que ofrecen una relación muy alta de potencia recibida a ruido térmico en el receptor, expresada como la relación de ganancia a temperatura de ruido. La mayoría de las estaciones terrestres de Intelsat se han proyectado para funcionar en una relación expresada como 40,7 decibelios por grado Kelvin, lo que exige una antena de 30 metros. A medida que los satélites han ido adquiriendo mayor potencia y ha ido aumentando el número de estaciones terrestres, se ha hecho cada vez más evidente que, para ciertos tipos de tráfico, unas estaciones más pequeñas y menos costosas pueden exhibir una mejor relación eficacia-coste para ciertas intensidades de tráfico. El propietario de una estación terrestre ha de conseguir equilibrar varios factores, por ejemplo el costo inicial de la estación, los gastos de explo-



LA AGRUPACION DE SEÑALES en el sistema Intelsat se conoce como acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA). De acuerdo con esta técnica, cada transpondedor del satélite lleva una señal cuya anchura de banda es de unos 36 megahertzios. Dentro de esta banda, a unas portadoras individuales se les asigna anchuras de banda que van desde 2,5 hasta 36 megahertzios. En la figura se muestra cómo cuatro de estos transpondedores podrían subdividirse en portadoras de varios tamaños y diferentes capacidades de canal. El número inferior, de los dos que se dan para cada portadora, representa la anchura de banda; el superior, la capacidad de canal. De aquí que una banda subdividida en 10 portadoras de 2,5 megahertzios tenga una capacidad total de 360 canales. Por otra parte, si la banda se subdivide en portadoras más pequeñas, el número de canales será mayor. Las estaciones terrestres definen cada portadora que transmiten; ésta puede contener grupos de canales telefónicos destinados a diferentes países. Un transpondedor puede también llevar dos canales de televisión, cada uno de ellos equivalente a seiscientos canales telefónicos.



LA OTRA TECNICA DE TRANSMISION que se está adoptando en la actualidad se denomina acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA). Según este método, la capacidad de anchura de banda de un transpondedor se utiliza haciendo que curse una secuencia de señales, todas a la misma frecuencia pero separadas en el tiempo, en vez de colocar las señales simultáneamente a diferentes frecuencias, como ocurre en el caso de la técnica por división de frecuencia. La de división en el tiempo hace posible que varias estaciones terrestres compartan un transpondedor, transmitiendo cada una de ellas a la misma frecuencia y en cortas ráfagas sincronizadas, de forma que no se solapen cuando lleguen al satélite. La salida del transpondedor es un flujo continuo de señales separadas en el tiempo. Este tipo de división no sólo es más flexible que el de frecuencia, sino que tiene la ventaja de que, con una sola señal de portadora a cualquier frecuencia en el transpondedor, éste puede funcionar a toda potencia sin diafonía, es decir, sin interferencias entre las señales.

tación, las cuotas por circuito para uso del sistema y el número y la distribución de estaciones terrestres en la zona geográfica de la que es responsable dicho propietario.

Las estaciones terrestres más pequeñas son más económicas, pero la tasa por circuito es ligeramente superior. Otro aspecto que es preciso tener en cuenta es que la anchura del haz transmitido es inversamente proporcional al diámetro del reflector de la estación. Por ello, el hacer uso de reflectores muy pequeños podría dar lugar a interferencias con los satélites próximos en órbita y limitar el espacio orbital. (Los satélites Intelsat que atienden las mismas rutas están, en la actualidad, separados 2500 km uno del otro.) Recientemente, Intelsat aprobó la utilización de estaciones terrestres con reflectores de 10 metros de diámetro. El costo inicial de éstas sería de un tercio del costo de las estaciones con reflector de 30 metros, aproximadamente; la cuota por utilización del satélite sería sólo un 50 por ciento mayor. De lo anterior se deduce que es de prever que este tipo de estaciones llegará a ser el más común.

Otra tendencia actual en el sistema Intelsat es el creciente empleo de técnicas digitales. En la década de 1980, el acceso múltiple por división en el tiempo estará ya ampliamente difundido. Las señales telefónicas y de televisión, que se originan en forma analógica, serán convertidas a una forma digital para su transmisión por circuitos de satélite. De hecho, ya existen técnicas numéricas de codificación y procesamiento para la compresión de la anchura de banda. Este hecho y la creciente transmisión de señales de datos y ordenador, ya en formato numérico, acelerarán en las comunicaciones por satélite lo que en las terrestres se conoce como revolución digital.

Otros sistemas y servicios

El sistema Intelsat está cumpliendo a la perfección la tarea que se le ha asignado de interconectar las redes terrestres de comunicación de muchos países. Sin embargo, en la utilización internacional que normalmente se hace del sistema se usa sólo una de las varias ventajas de las comunicaciones por satélite: la capacidad para conectar fácilmente puntos situados a gran distancia. Muy próximas en importancia están otras dos ventajas inherentes a las comunicaciones por satélite sobre las comunicaciones terrestres, la de dirigir el tráfico a destinos múltiples y la de atender requerimientos específicos determinados por el emplazamiento,

tamaño o forma y grado de movilidad del usuario. Pronto entrará en servicio otro tipo de sistemas por satélite que aprovechen estas tres posibilidades para fines comerciales. Entre ellos, los sistemas nacionales destinados al establecimiento de las comunicaciones dentro del ámbito de un país, de comunicaciones móviles para conexiones con barcos, aviones y vehículos terrestres, y sistemas especiales para distribución de televisión y comunicaciones entre computadores.

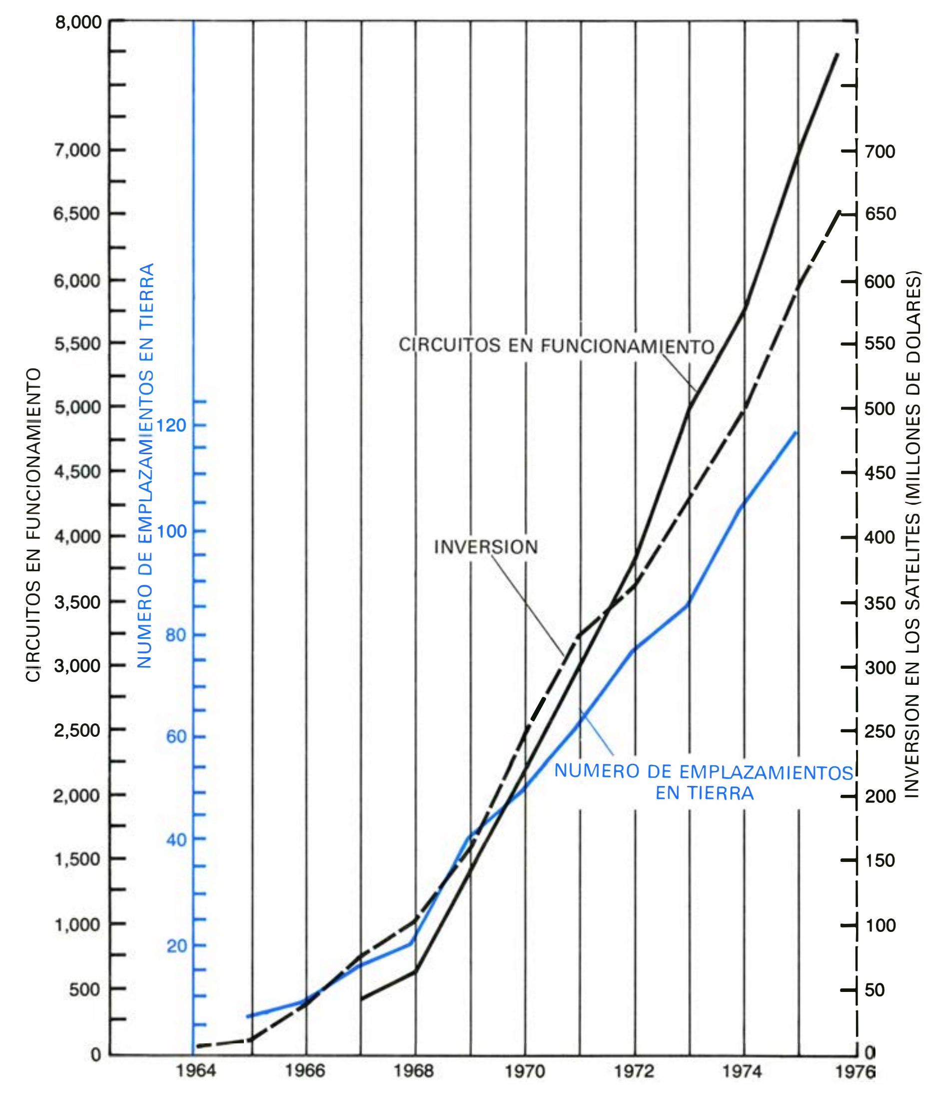
La URSS fue el primer país en poner en servicio un sistema nacional independiente de comunicaciones por satélite. El sistema ruso, que posee varias docenas de estaciones terrestres, se emplea principalmente para distribución de televisión. Canadá fue el segundo país en hacerlo; su sistema Telesat distribuye las comunicaciones vocales y de televisión por todo el país. En Estados Unidos son tres los sistemas dedicados, en la actualidad, al servicio interno de la nación. El primero en entrar en servicio fue el *Westar* de la Western Union; el segundo, el *Satcom* de la RCA; el tercero, y más moderno de los tres, emplea satélites Comstar de la Comsat General Corporation y estaciones terrestres construidas por la American Telephone & Telegraph Co. y la General Telephone and Electronics Corporation.

Los sistemas nacionales se han beneficiado en general de la tecnología desarrollada en los programas espaciales del gobierno y los sistemas Intelsat. Como estos sistemas son nuevos, pueden asimilar rápidamente cualquier tecnología sin que exista el problema de sustitución de las instalaciones en servicio. Por ejemplo, el sistema RCA ha conseguido, en su primera generación, importantes avances en la tecnología de los satélites. El *Satcom*, de la RCA, se encuentra totalmente estabilizado en el espacio a lo largo de tres ejes por un conjunto de ruedas giroscópicas colocadas en el interior del satélite. El conjunto de antenas, montadas en el interior del armazón, puede ser orientado así con precisión hacia la tierra y las células solares hacia el sol, para generar la máxima potencia por unidad de superficie de las antenas. El sistema de comunicaciones *Satcom* está canalizado en 24 transpondedores, 12 con polarización en ambos sentidos, con lo que se consigue una anchura de banda de 1000 megahertzios.

El sistema RCA y otros sistemas nacionales han logrado importantes éxitos en cuanto a aproximarse al destinatario final con sus servicios de comunicación. Mientras el sistema Intelsat presta servicio entre países, los sistemas nacionales hacen lo propio entre estados, ciudades e incluso comunidades más pequeñas, tales como pueblos y zonas aisladas. Este tipo de servicios exige características especiales de diseño en los satélites y modificaciones aun más importantes en las estaciones terrestres.

De hecho, ya se han llevado a la práctica interesantes adaptaciones de estaciones terrestres a necesidades especiales del abonado; permiten ahora que las comunicaciones por satélite lleguen al abonado directamente, sin importar la distancia, movilidad o dificultad del terreno. En Alaska, por ejemplo, las lejanas poblaciones de su zona montañosa están siendo actualmente atendidas por estaciones especialmente diseñadas para soportar las tormentas y la nieve. Se está construyendo otras, para zonas congestionadas, que se colocarían sobre el tejado del domicilio del usuario. Con algunas variaciones de diseño para su adaptación a la estructura superior de los barcos, las estaciones terrestres se convierten en marítimas. En la actualidad se está desarrollando un nuevo tipo de estación de tamaño tan pequeño que puede levantarla una persona y puede transportarse en una furgoneta.

El resultado de esta serie de adaptaciones es la posibilidad de ofrecer una amplia gama de servicios especiales: el telefónico por circuito sencillo o múltiple, el de televisión a nivel intercontinental, combinado con la red de distribución local, la transferencia y el acceso a distancia de datos de ordenador, el facsímil y el "correo electrónico". El futuro ofrece muchas oportunidades para una amplia expansión de todos estos servicios y otros que aún quedan por desarrollar.



EL DESARROLLO DEL SISTEMA INTELSAT se presenta aquí en función de los dólares invertidos, circuitos en funcionamiento y número de estaciones terrestres. Las cifras de inversión hacen referencia sólo al desembolso por equipos espaciales, que son principalmente los satélites y los costos de su lanzamiento. Los propietarios de las 150 estaciones terrestres, enclavadas en 119 lugares diferentes de 80 países, han hecho una inversión similar. En los cinco últimos años, el tráfico que el sistema cursa se ha triplicado. Es probable que su crecimiento continúe a razón del 15 %.

El origen de la aterosclerosis

La hipótesis monoclonal, según la cual las células proliferantes de una placa aterosclerótica proceden todas de una célula mutada, abre nuevas líneas de investigación sobre las causas de las enfermedades coronarias

Earl P. Benditt

Las enfermedades cardiovasculares se han convertido en la causa más frecuente de muerte en los Estados Unidos y en otros países occidentales, no sólo porque la duración de la vida es mayor, sino también porque existen factores desconocidos, relacionados con la vida moderna, que están aumentando la incidencia de la aterosclerosis, que es la enfermedad arterial responsable de la mayoría de las crisis y ataques cardíacos. Para identificar estos factores es preciso que conozcamos primero la verdadera naturaleza de las lesiones típicas de la aterosclerosis. Las placas ateroscleróticas, que son engrosamientos circunscritos de la pared arterial, menguan la luz de los vasos e inician la formación de trombos sanguíneos que pueden ocluir por completo una arteria importante.

En los últimos 15 años se ha comprobado que la placa se caracteriza por el acúmulo de células musculares lisas. La dificultad está en explicar por qué se acumulan dichas células. Algunos pensamos ahora que las células de la placa son hijas de una sola célula muscular lisa, cercana a la placa, que ha sufrido mutación. Si ello es verdad, la placa puede compararse a un tumor benigno de la pared arterial. Y si efectivamente puede compararse, la investigación de los factores desencadenantes debería orientarse hacia el estudio de las circunstancias genéticas o ambientales responsables de la mutación original, que son análogas a las que transforman las células y originan el cáncer. En este artículo me propongo revisar las teorías que más han influido en la concepción de la aterosclerosis y expondré a continuación algunos experimentos que suscitaron la nueva hipótesis de la célula única, junto con los argumentos que la apoyan, examinando algunas implicaciones del nuevo enfoque.

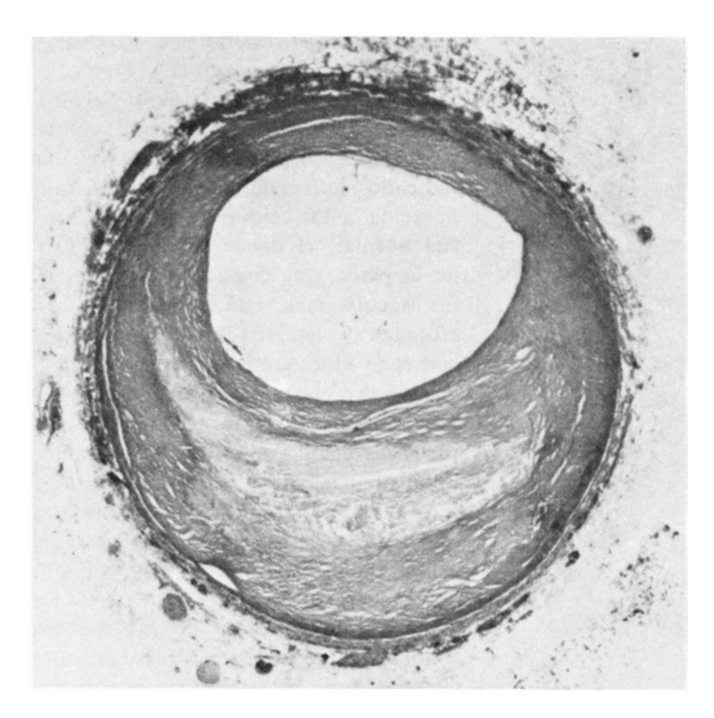
Las arterias son conductos que tienen una estructura y composición celular especiales que les permite conducir sangre bajo presión pulsante y mantenerse y repararse por sí mismos. La pared arterial consta de tres capas: la íntima, la media y la adventicia. Recubriendo la superficie interna de la íntima, se encuentra una capa única de células endoteliales, que retiene las células sanguíneas dentro de la luz de la arteria y regula el paso del agua y de otras sustancias desde el plasma sanguíneo a los tejidos. La composición del resto de la íntima es variable. Puede constar sólo de fibras de tejido conjuntivo acelular o puede incluir células, de acuerdo con el tipo de arteria y de la edad y el sexo del individuo; la íntima de las arterias coronarias tiende a ser más gruesa en los varones que en las mujeres, y el grosor y el número de las células aumenta con la edad en ambos sexos. La íntima es la capa que sufre los efectos de la aterosclerosis.

La membrana elástica interna es una capa de tejido elástico que separa la íntima de la media, capa ésta que constituye el soporte principal de la arteria. Las células de la capa media son musculares lisas, llamadas así porque sus fibras contráctiles no siguen el modelo estriado de las células musculares esqueléticas. En las arterias elásticas como la aorta, las células de la media se disponen formando pequeños grupos espirales entre las fibras elásticas gruesas, las cuales constituyen el soporte de la pared arterial; las arterias que irrigan los órganos, como las arterias coronarias, tienen una estructura semejante, pero con menos tejido elástico y una cantidad relativamente mayor de células. Las células musculares lisas son las encargadas de segregar las proteínas fibrilares elastina y colágeno y los hidratos de carbono (glucosaminoglucanes).

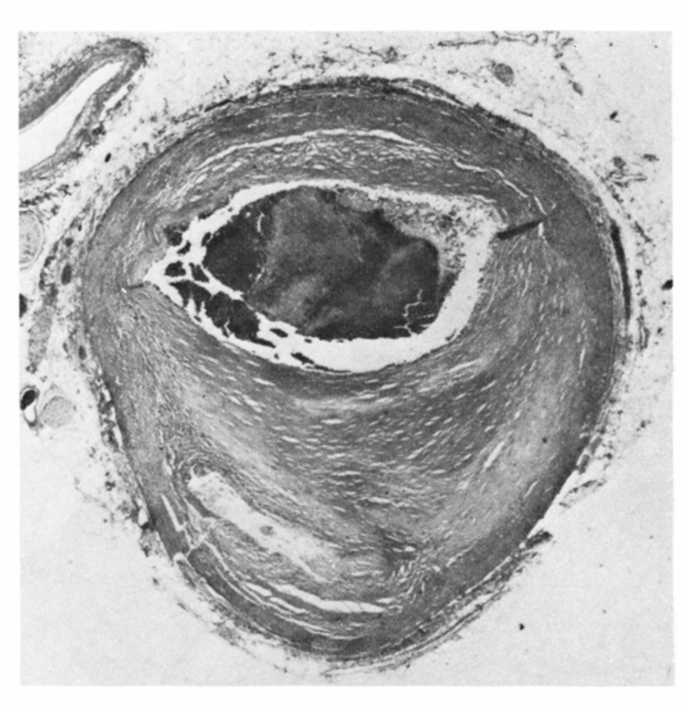
La capa más externa de la pared arterial, la adventicia, está compuesta por células llamadas fibroblastos y por sus asociados intercelulares colágeno y glucosaminoglucanes. Por la adventicia discurren los vasos sanguíneos que nutren las capas externas de la pared arterial y sirven de vía de enlace de ésta con los tejidos circundantes.

Como cualquier otro tejido, las arterias pueden sufrir alteraciones patológicas: lesiones y procesos reparadores, infecciones, inflamaciones y tumores. Ha sido difícil caracterizar estos procesos porque todos se parecen mucho en sus fases finales y sólo podemos estudiar su estructura microscópica en dos ocasiones: en la autopsia y, con menor frecuencia, durante la intervención quirúrgica. La diferenciación entre los distintos procesos patológicos es factible si se puede seguir su evolución desde el principio, a partir de la obtención de muestras de tejido para su examen microscópico, o si se encuentran características peculiares que las distingan entre sí. Esto se consigue estudiando las enfermedades animales que se parecen a las humanas. Es mucho lo que puede aprenderse en los modelos animales, aunque siempre con la reserva de que ignoramos hasta qué punto es superponible lo que pasa en el animal con lo que pasa en el ser humano.

Las lesiones características de la aterosclerosis, por lo menos tal como se ven en la autopsia, son las placas fibrosas elevadas. Aparecen (en el vaso disecado, sin distender) como zonas bien

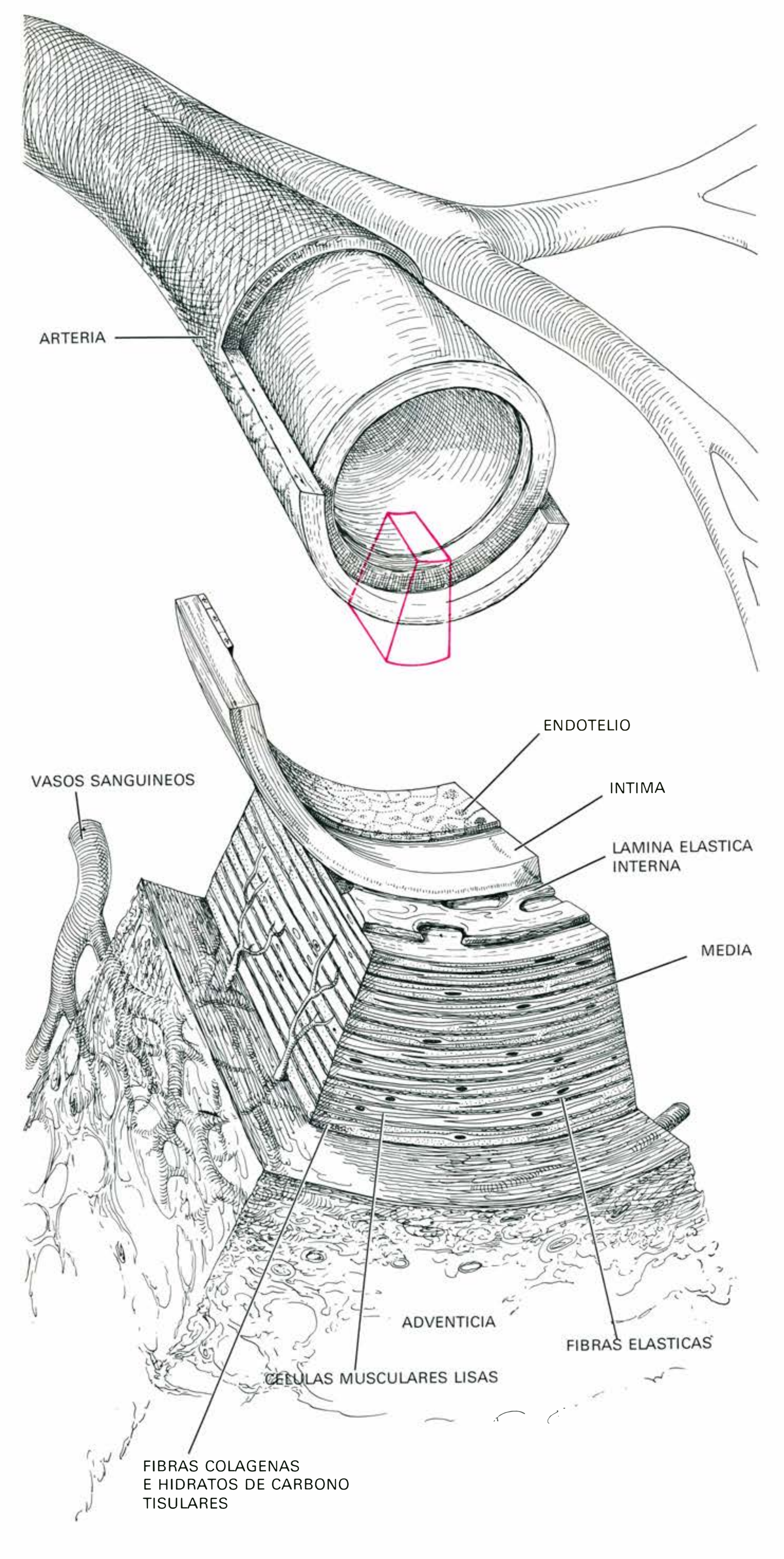


PLACA ATEROSCLEROTICA que estrecha la luz de una arteria coronaria humana, ampliada 19 diámetros. La placa es un engrosamiento de la pared arterial, formada fundamentalmente por tejido conjuntivo y células musculares lisas, con una zona con detritus celulares y grasos *(color gris pálido).* La fotomicrografía ha sido realizada por el autor.



TROMBO formado en la parte distal del estrechamiento producido por una placa aterosclerótica. Obstruye una arteria coronaria e interrumpe el flujo de sangre a una parte del músculo cardíaco provocando una crisis cardíaca fatal. Las regiones oscuras del trombo están formadas por eritrocitos y, las claras, por leucocitos y plaquetas.

SUPERFICIE INTERNA ATEROSCLEROTICA de una arteria agrandada en dos veces y media su tamaño natural. Se trata de un segmento abierto de aorta humana. Las placas aparecen como engrosamientos que sobresalen en el conducto interior de la arteria.



LA PARED ARTERIAL está formada por varias capas cuya composición varía según la arteria. Aquí se detalla un segmento de una arteria elástica de gran tamaño, como la aorta humana.

delimitadas que resaltan sobre las partes no afectadas de la íntima y cuya coloración oscila entre el gris perla y el amarillo grisáceo. El componente celular principal de la placa es, como ya se ha indicado, la célula muscular lisa, muy parecida a las células de la pared arterial normal; el denso tejido conjuntivo de la placa, que consta básicamente de fibras colágenas, está infiltrado de macrófagos y leucocitos. La placa suele contener glucosaminoglucanes y, algunas veces, elastina y proteínas sanguíneas, como el fibrinógeno. Dentro y fuera de las células se encuentran también lipoproteínas, que transportan el colesterol por la sangre. En la parte más profunda de las lesiones aparecen restos de células muertas o moribundas y lípidos (grasas) en cantidades variables. En los detritus reblandecidos de las lesiones avanzadas puede llegar a verse cristales de colesterol. Estos detritus grasos son los que han sugerido el nombre de aterosclerosis, del griego "athera" (arista) y "esclerosis" (endurecimiento).

Las placas de aterosclerosis pueden cerrar por sí solas la luz arterial, aunque la mayoría de las veces su efecto consiste en facilitar la obstrucción del vaso por un trombo que se forma al alterarse el frágil equilibrio del sistema de coagulación de la sangre, cuya función normal es la de ocluir temporalmente pequeños escapes o lesiones de las paredes vasculares. Un trombo es un conglomerado complejo de plaquetas, leucocitos y eritrocitos envueltos en una red de fibrina, que es la principal proteína de la coagulación. La trombosis es frecuente en las venas de las piernas; para que se presente en una arteria, que tiene un flujo sanguíneo rápido, se precisan condiciones muy especiales: que el flujo sanguíneo se retarde o se haga turbulento, que se lesione el recubrimiento interno del vaso facilitando el depósito de las plaquetas en su superficie y, quizás, que aumente la pegajosidad de las plaquetas. Estas condiciones se dan en la parte distal de una placa, donde suelen existir zonas de turbulencia y algunas veces aparecen ulceraciones en la superficie endotelial. Las plaquetas se pegan a su superficie y se agregan formando una masa a la que sucesivamente se van incorporando acúmulos de leucocitos, depósitos de fibrina formada a partir del fibrinógeno del plasma y nuevos acúmulos de plaquetas y glóbulos rojos. La masa estratificada que se forma puede adoptar el aspecto de un trombo mural aplanado, o puede crecer hasta convertirse en un trombo oclusivo que bloquee el paso de la sangre.

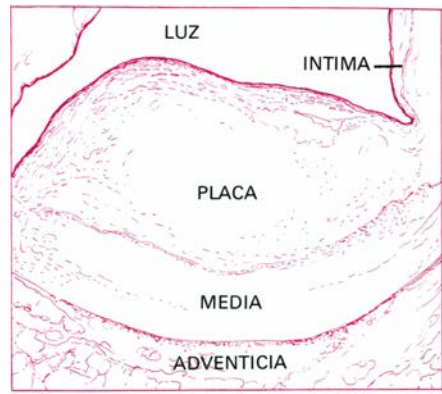
Las teorías que han orientado la in-

vestigación de la aterosclerosis hasta nuestros días derivan de dos conceptos básicos que se originaron en el siglo XIX. La teoría más en boga va ligada al nombre del patólogo alemán Rudolf Virchow. Sostiene que la infiltración de la pared arterial por sustancias grasas procedentes del torrente sanguíneo origina los depósitos de colesterol, que actúan como irritantes, dando lugar a la inflamación y proliferación de las células. Esta teoría de la insudación parece favorecida por la mayor frecuencia de la enfermedad coronaria entre las poblaciones que tienen una concentración más elevada de colesterol en sangre. Estos niveles elevados de colesterol se han correlacionado a su vez con la distribución geográfica de las dietas ricas en alimentos grasos y en colesterol, hallazgo que ha justificado los intentos que se han hecho de prevenir la aterosclerosis mediante la regulación de la dieta. Esta teoría de la insudación parecía confirmada por los experimentos del investigador ruso N. N. Anitschkow, de principios de este siglo, que descubrió que podía producirse en los conejos una enfermedad parecida a la aterosclerosis humana añadiendo yemas de huevo y colesterol a su dieta, elevando con ello la grasa y el colesterol en sangre. Es interesante señalar que en esta enfermedad, provocada en el conejo sujeto a experimentación, los lípidos aparecen precozmente en las lesiones, y puede demostrarse que proceden de la sangre. Este modelo experimental ha influido enormemente en las ideas de los investigadores respecto del desarrollo de esta enfermedad en el hombre.

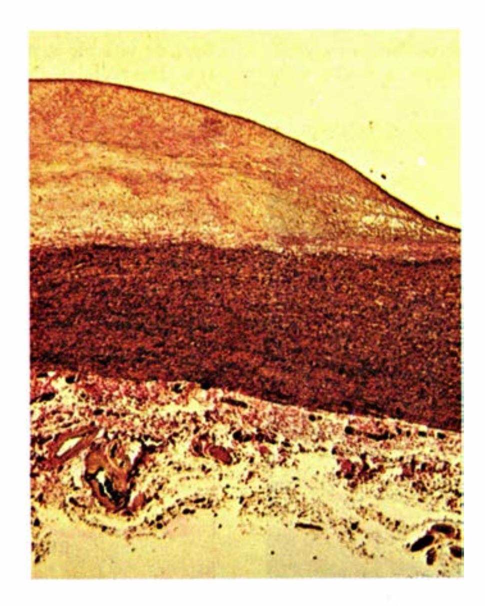
El hecho de que las autopsias de lactantes y niños muestren pequeños depósitos de grasa en los grandes vasos sanguíneos ha dado mayor crédito a la teoría de la insudación de lípidos, que parece apoyar también la historia natural de la enfermedad, la cual comienza con las estrías grasas de la infancia y evoluciona hasta formar la placa fibrosa, bien desarrollada, del adulto. Sin embargo, esta interpretación tiene el inconveniente de que las estrías grasas aparecen con la misma frecuencia en los niños de cualquier población, en tanto que la aterosclerosis adulta es rara en algunas poblaciones y frecuente en otras.

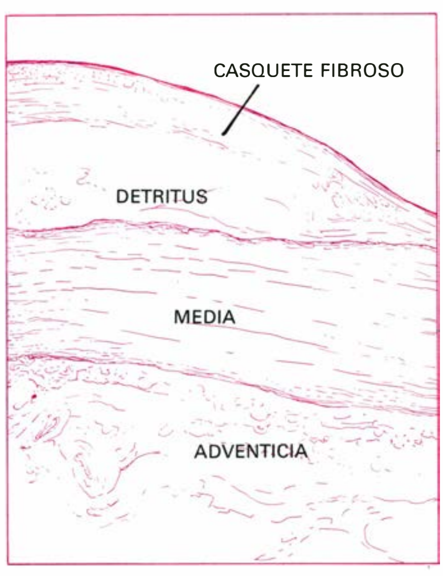
La otra teoría básica del origen de la aterosclerosis, la teoría de la incrustación, sostiene que la placa empieza siendo un pequeño trombo mural que se va transformando en una masa de tejido incorporado a la íntima, a medida que las células de la pared arterial emigran hacia su interior, se multiplican y segregan las sustancias celulares características.



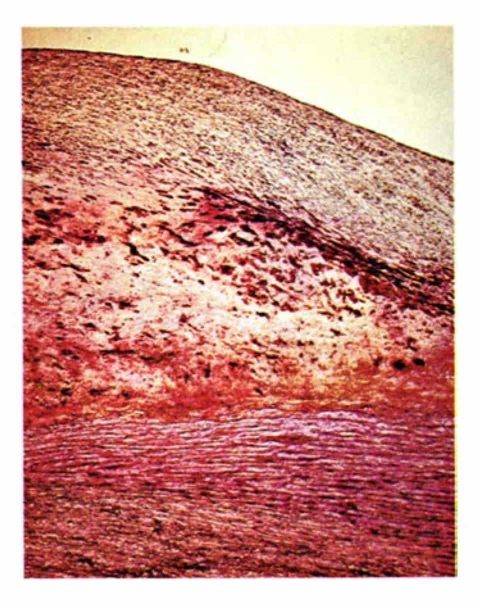


CORTE DE UNA PLACA de una arteria coronaria humana agrandada 24 veces, cuyo esquema se da a la derecha. La placa aterosclerótica, ligeramente oval, teñida de rosa, es un engrosamiento de la íntima de la arteria. Sigue la capa media, teñida de pardo oscuro. La capa externa, la adventicia, contiene colágeno y tejido graso. Fotomicrografía realizada por el autor.



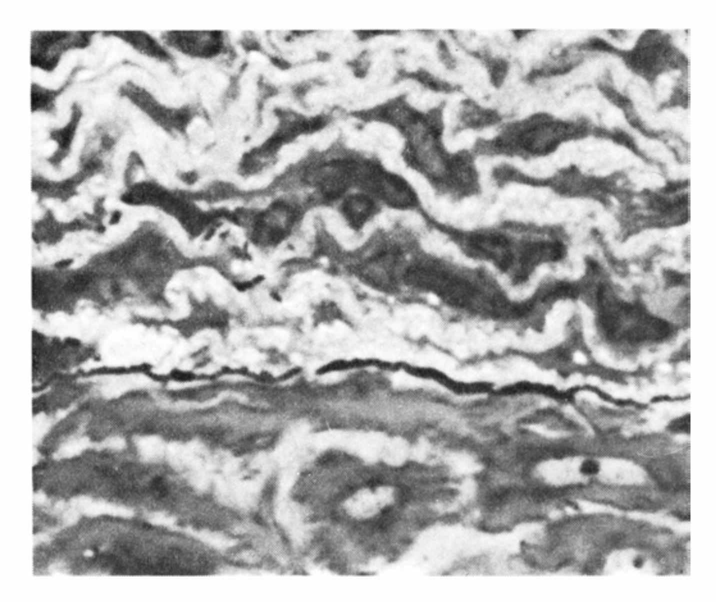


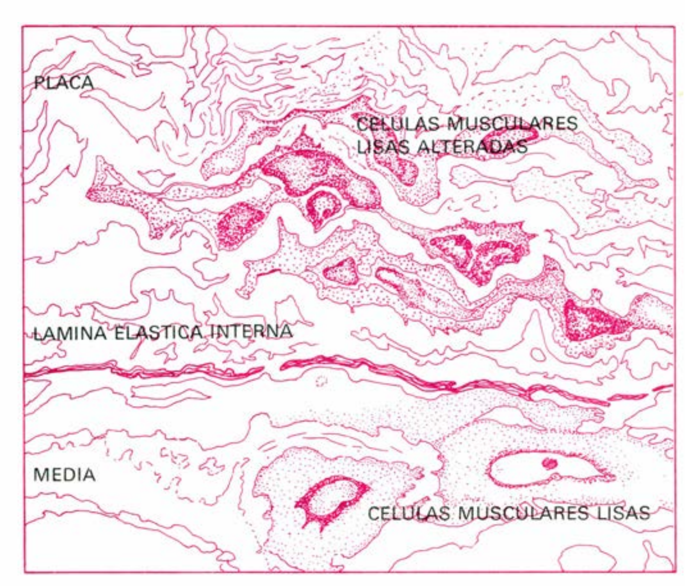
SECCION DE UNA PLACA de una aorta humana, aumentada 27 veces. El casquete fibroso de la placa es una masa celular incluida en una matriz de colágeno y otros materiales extracelulares, bajo lo cual se hallan detritus. La placa se eleva sobre la superficie de la íntima adyacente.





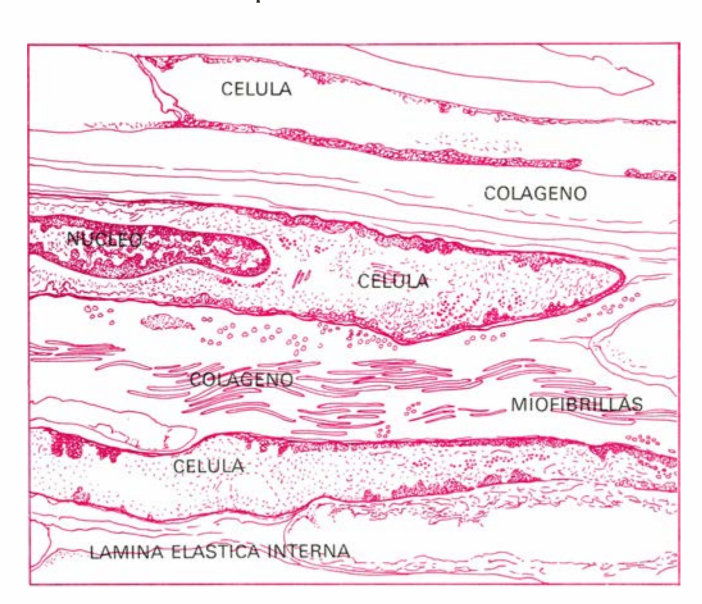
PLACA DE LA AORTA, agrandada 60 diámetros y teñida para visualizar los núcleos celulares *(azul)* y la grasa *(naranja)*. El casquete está formado por muchas células incluidas en una matriz fibrosa incolora. Entre los detritus hay células que contienen grasa, y, bajo ellas, grasa extracelular.

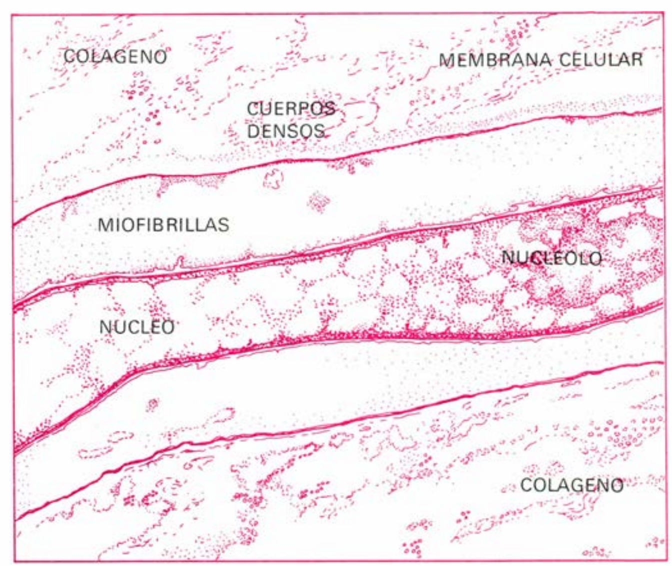




LA NATURALEZA CELULAR de una placa aterosclerótica precoz se demuestra en esta micrografía. Sección que abarca la media y la base de una placa precoz de la aorta de un pollo, aumentada 1200 veces. Las células de la placa son células musculares lisas alteradas.







CELULAS AISLADAS de una placa, visibles en unas microfotografías obtenidas por Ned S. Moss. Proceden de una lesión precoz de arteria de pollo, aumentada 15.000 veces *(arriba)*. Las fibras de colágeno aparecen de frente y de perfil, dispuestas entre las células musculares lisas. Abajo, se ve una célula muscular lisa aislada, aumentada 40.000 veces, en una microfotografía de una placa de arteria coronaria humana.

Las lesiones localizadas de la pared arterial de los animales sometidos a experimentación dan lugar a un proceso de reparación de este tipo, y las sustancias que pasan del plasma a la pared, junto con los desechos del trombo, que se desintegran y mueren, confieren a estas lesiones un aspecto parecido al de las placas de ateroma. Se ha postulado que en la aterosclerosis humana estos episodios repetidos de lesión endotelial, seguidos de trombosis reparadora, emigración y secreción, facilitarían que la lesión alcanzara un tamaño suficiente como para obstruir la arteria.

Estas ideas acerca de la naturaleza y el origen de la aterosclerosis empezaron a cambiar cuando el microscopio electrónico reveló la composición celular de la placa, demostrando que el casquete celular y fibroso que recubre los restos ricos en colesterol no contenía fibroblastos, que son las células que proliferan para curar las heridas de la piel, sino que constaba de células musculares lisas semejantes a las de la pared arterial normal. Se descubrió, además, que la placa humana contiene pocos lípidos en su estadio inicial, y, por consiguiente, no podía considerarse que la insudación de lípidos fuera el factor desencadenante. En la actualidad, todas las teorías en boga sobre la génesis de la aterosclerosis participan ya de la creencia en que las lesiones empiezan por la aparición de acúmulos excesivos y circunscritos de células musculares lisas en la íntima. El problema reside en explicar cuáles son las causas que inician y dan lugar al crecimiento de estas acumulaciones.

Después de haber trabajado con varios modelos de aterosclerosis animal en nuestro laboratorio de la Escuela de Medicina de la Universidad de Washington, y habiéndolos encontrado poco satisfactorios, en 1967 empezamos a estudiar con Ned S. Moss la aterosclerosis en los pollos. En estos animales, Ruth Pick, Jeremiah Stamler y Louis N. Katz, del Michael Reese Hospital, habían descubierto que el desarrollo de las lesiones grasas de las arterias del pollo producidas tras una dieta con colesterol podían prevenirse administrando una hormona estrógena. Su hallazgo dio lugar a que se ensayara el efecto de la administración de esta hormona femenina en algunos enfermos varones con enfermedad coronaria, a fin de prevenir una segunda oclusión. En colaboración con Moss, examiné al microscopio electrónico las arterias de los pollos que habíamos alimentado con colesterol y tratado con estrógenos: pudimos darnos cuenta de que las lesiones inducidas no se parecían a las lesiones ateroscleróticas en el hombre. Parecían estar formadas enteramente por células repletas de grasa, derivadas de los macrófagos sanguíneos, sin que encontráramos ninguna prueba de proliferación de las células musculares lisas, y nunca observamos las placas elevadas características de la enfermedad humana. En cambio vimos que en los pollos que no recibían ninguna dieta especial se desarrollaba una enfermedad arterial cuyas lesiones tenían un parecido sorprendente con las placas de la aterosclerosis coronaria humana. De hecho, esta enfermedad que se presenta espontáneamente en el pollo había sido ya descrita en la literatura de la patología comparada, pero todos habíamos tendido a ignorarla al centrar nuestra atención en la enfermedad experimental producida por el colesterol.

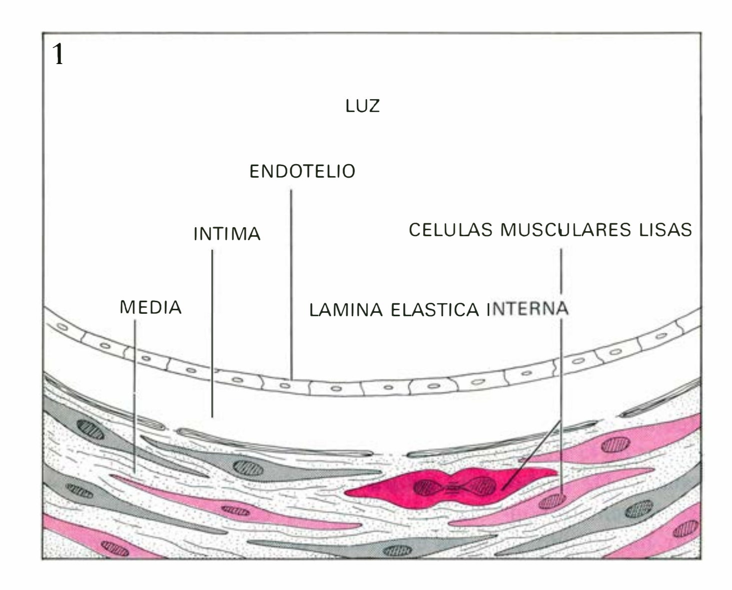
A partir de entonces pudimos observar los estadios más precoces de la formación de la placa en los pollos jóvenes no tratados; encontramos que la primera alteración que se observa es la aparición de pequeños grupos celulares en la íntima, que normalmente está poblada solamente por varias células ocasionales. Reconstruyendo la secuencia de los hechos, supusimos que una célula, o quizás unas cuantas de ellas, podían haber emigrado de la media a la íntima, y su lenta proliferación había producido los acúmulos celulares. En estas lesiones primitivas no había pruebas de depósito de colesterol. Las células degeneradas o muertas, los detritus intercelulares y los depósitos de colesterol aparecieron en estadios más avanzados. ¿Por qué? ¿Cuál era la circunstancia capaz de iniciar la proliferación, la multiplicación y la degeneración de estas células hasta formar la placa fibrosa desarrollada?

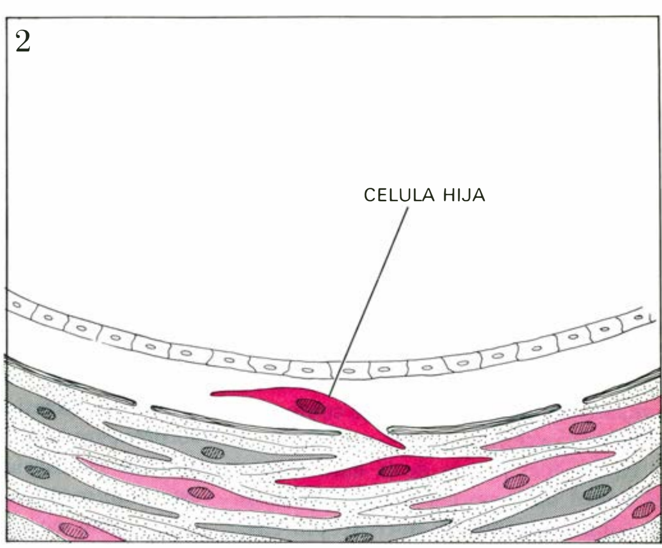
Observamos que las células que poblaban esta placa espontánea en su período precoz se diferenciaban sutilmente de las células normales de la pared arterial. Estaban dispuestas de un modo distinto, parecían ser de un tamaño más pequeño y no tenían uniones intercelulares; a diferencia de las células normales de la media, fabricaban mayores cantidades de colágeno que de elastina. Además, las lesiones primitivas desarrollaban vacuolas grasas (cavidades) cuando los pollos se alimentaban con colesterol, en tanto que las células normales contiguas de la pared arterial no desarrollaban dichas vacuolas. Era posible que el distinto comportamiento observado entre las células de la pared arterial y las células de las placas de los pollos se debiera a algún cambio metabólico relacionado con el traslado de las células a su nueva localización.

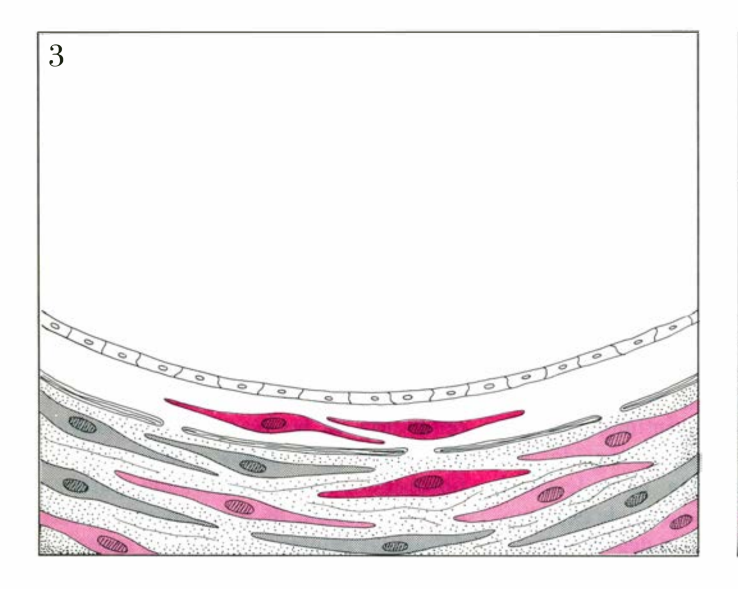
Se vio luego la necesidad de comprobar cuál era el aspecto de las células de la pared arterial normal en el curso de una lesión y de su proceso reparador. En colaboración con John Poole, de la Universidad de Oxford, durante su visita a nuestro laboratorio, y con Stephen Cromwell, simulamos una lesión abriendo una pequeña sutura en la pared arterial que daba lugar a la formación de un trombo alrededor de la parte de la sutura en contacto con la sangre; se observó que las células musculares lisas emigraban desde la media al interior del trombo, en donde se multiplicaban. Estas células tenían todas las características de las células musculares lisas normales de la media (descartando algunas distorsiones de la posición), entre las cuales se contaba también la formación de elastina y el desarrollo de uniones intercelulares. En otras palabras, eran muy distintas de las células musculares lisas modificadas que habíamos visto en las lesiones espontáneas de los pollos.

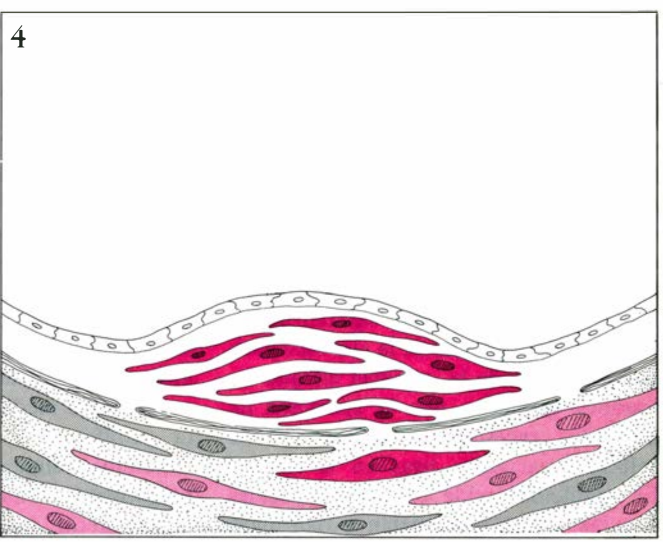
Nos dimos cuenta entonces de que las teorías de la insudación-irritación seguían dominando nuestra forma de pensar sobre la proliferación celular observada en las placas. Se había dado por cierto que dichas células eran los fibroblastos que proliferaban para reparar la herida, de acuerdo con la idea de que las células aparecían en respuesta a la irritación, y, a pesar de que el microscopio electrónico había demostrado que las células eran musculares lisas, nadie se atrevió a ponerlo en duda.

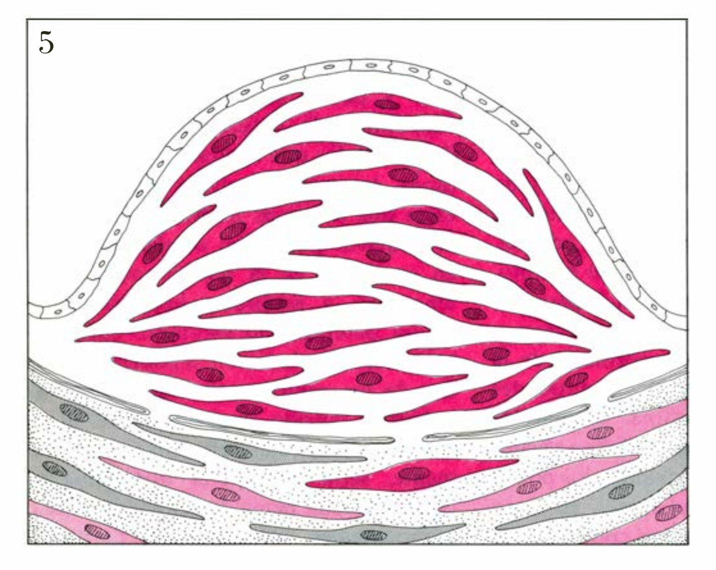
El estudio de las lesiones espontáneas y de las inducidas por la sutura subrayaban la naturaleza poco común de las células que forman la placa espontánea, las cuales podrían tener uno de estos dos orígenes: podrían proceder de la pequeña población celular que se ve en ocasiones en la media normal, que empezara a proliferar bajo el efecto de un determinado estímulo, quizá relacionado con la lesión, o podrían proceder de las células musculares lisas que hubieran sufrido una mutación. Si se trataba de células alteradas genéticamente, sería de esperar que todas las células de una placa determinada fueran monoclonales, es decir, que derivaran de una sola célula mutada, como las células de un tumor benigno. Por el contrario, si la placa se originaba en respuesta a una lesión o a algún otro estímulo,

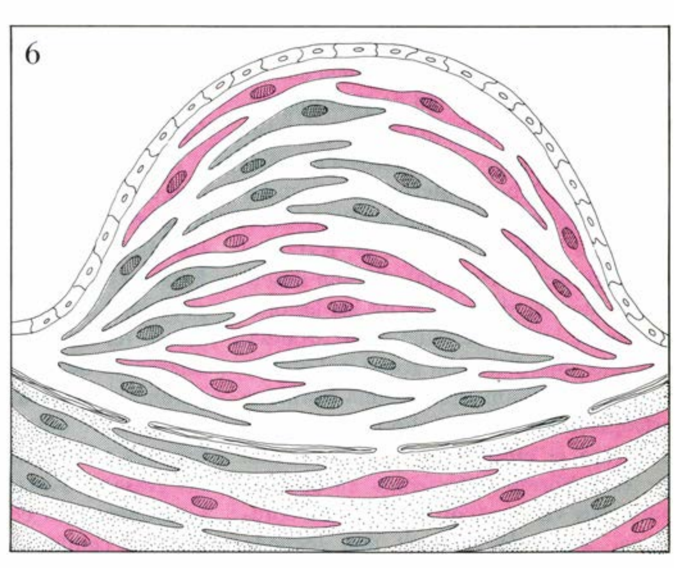










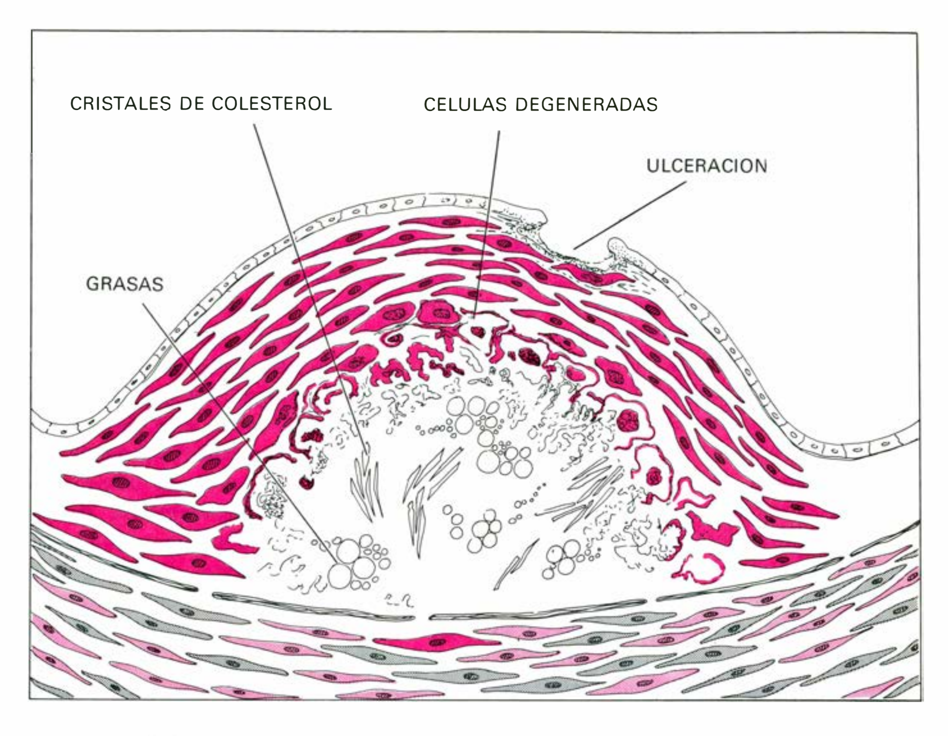


GENESIS DE UNA PLACA según la teoría monoclonal. El proceso comienza en el interior de la media. Hay dos tipos celulares. Una célula *(color oscuro)* ha sufrido una mutación que le confiere una ventaja sobre las demás, y, por efecto de algún estímulo, empieza a dividirse (1). Sus células hijas emigran hacia la íntima (2). La progenie de la célula mutada, gracias a una ventaja selectiva y quizá liberada de algún control de la proliferación, continúa multiplicándose, engruesa la íntima (3, 4) y forma con el tiempo la placa abombada (5) cuyas células son todas descendientes de la célula original mutada. El último dibujo muestra (6), como contraste, una placa policlonal, que se produciría si emigraran y proliferaran, a la vez, células pertenecientes a los dos tipos celulares. Esta hipótesis enriquece la información sobre las crisis cardíacas.

era de suponer que su efecto se hiciera notar en muchas células normales al mismo tiempo, en cuyo caso las células de las placas serían policlonales. Este problema, a saber, determinar si la proliferación es monoclonal o policlonal, puede resolverse en el ser humano mediante una técnica genética.

Esta técnica, originalmente aplicada por el genetista Sturtevant al estudio de los tejidos en crecimiento de la mosca de la fruta, se basa en la idea de que un individuo animal puede ser un "mosaico" compuesto de dos poblaciones celulares distintas. Se sabe que éste es el caso de todas las mujeres, como postuló por vez primera Mary F. Lyon, del Medical Research Council Radiobiology Unit, de Harwell, Inglaterra. En las células femeninas existen dos cromosomas *X*, uno procedente del padre y otro de la madre: sólo uno de ellos es activo en el adulto. El otro se inactiva precozmente en el desarrollo embrionario y permanece en el núcleo como un pequeño acúmulo denso de cromatina, conocido con el nombre de cuerpo de Barr. Al parecer, esta inactivación se produce al azar, de manera que el cromosoma activo igual puede ser el materno que el paterno. Si el cromosoma materno tuviera un gene "marcador" para un determinado enzima por ejemplo, que fuera distinto del correspondiente gene del cromosoma paterno, podría reconocerse las poblaciones celulares que tienen uno u otro gene activo. Se han descrito varios genes polimórficos de este tipo en los cromosomas *X*. Uno de ellos codifica para el enzima glucosa-6-fosfato dehidrogenasa (G-6-PD), y sus dos formas codifican dos tipos de enzimas que pueden diferenciarse mediante la electroforesis; cuando se someten a un campo eléctrico, el tipo *A* se desplaza más rápidamente que el tipo *B*.

Los individuos afectos de la anomalía hereditaria de los glóbulos rojos conocida con el nombre de rasgo drepanocítico poseen una modalidad de G-6-PD del tipo *A* que confiere resistencia al paludismo. Esta anomalía hereditaria es relativamente frecuente en la población negra de los Estados Unidos; originaria de las zonas palúdicas africanas, continuó persistiendo en las zonas palúdicas americanas. Alrededor del 40 por ciento de las mujeres negras son heterozigotos para el gene de la G-6-PD; es decir, sus células tienen los dos tipos de enzima. R. G. Davidson, H. M. Nitowsky y Barton Childs, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Johns Hopkins, aprovecharon la presencia de estos dos tipos enzimáticos para demostrar que una vez que se inactiva el cromosoma *X* en una célula humana, permanece siempre inactivo. Cultivaron muestras de piel de mujeres negras y vieron que las poblaciones de fibroblastos que crecían en el cultivo fabricaban los dos tipos de enzimas, lo que confirmaba la existencia de los dos tipos celulares. Cuando los investigadores aislaron y cultivaron una célula de dicha población mixta, cada clon (la progenie de una sola célula) mostró un solo tipo de enzima, *A* o *B*. El subcultivo repetido de las células de un determinado clon produjo siempre el mismo tipo de enzima. Una vez demostrada la estabilidad de las poblaciones celulares en la producción de un determinado tipo de enzima, fue posible resolver el problema inverso: analizar los extractos de muestras de tejidos para hallar su composición en G-6-PD mediante un análisis electroforético, y, consiguientemente, determinar la estructura celular. En la Escuela de Medicina de la Universidad de Washington, David Linder y Stanley M. Gartler estudiaron tumores de músculo liso uterino, y encontraron que cada tumor estaba compuesto de un solo tipo celular; Philip J. Fialkow y otros extendieron estos estudios a la leucemia y a varios tumores.



PLACA MONOCLONAL en estadios avanzados. Con frecuencia se ulcera en la parte de su superficie donde han muerto sus células endoteliales y musculares lisas. El interior está repleto de detritus grasos, que proceden de células muertas o degeneradas, del colesterol y las lipoproteínas.

En 1973 aplicamos esta técnica analítica al estudio de las placas ateroscleróticas y de los tejidos de la pared arterial normal obtenidos en la autopsia. El primer caso nos permitió estudiar 15 placas, de las cuales 4 sólo producían enzima del tipo *A*, 8 del tipo *B* y 3 presentaban una población mixta. En cambio, 25 de las 27 muestras de tejido de la pared de arteria normal sin lesiones mostraban la presencia bastante homogénea de los dos tipos celulares. (Cabe la posibilidad de que las dos muestras que tenían un patrón enzimático único pudieran contener pequeñas placas, aunque no podemos estar seguros.) Al analizar más casos, se puso de manifiesto esta interesante conclusión: las placas de ateroma sólo contenían, por lo general, un único tipo celular.

En 1975, T.A. Pearson, A. Wang, K. Solez y R. H. Heptinstall, de la Escuela de Medicina de Johns Hopkins, publicaron resultados casi idénticos basados en el estudio de un mayor número de casos. Y los mismos resultados se siguen recogiendo en ésos y otros laboratorios a medida que se multiplican las observaciones. Debo señalar que no es sorprendente que algunas lesiones ateroscleróticas no aparezcan como monoclonales, ya que junto a la placa, o en su interior, puede haber poblaciones celulares mixtas que contaminen el experimento, procedentes de las células sanguíneas o de las células del tejido conjuntivo adyacente a la pared celular. De hecho, temíamos que la contaminación de las células sanguíneas imposibilitara la

diferenciación por lo que los datos obtenidos fueron sorprendentemente claros.

Antes de aceptar que la presencia de un solo tipo celular en una determinada población de un organismo "mosaico" constituye una prueba de su origen monoclonal, deben resolverse algunos problemas previos. En primer lugar, debe comprobarse que el tamaño de los islotes celulares de un solo tipo que pueden encontrarse en un tejido normal (islotes que pueden ser debidos a accidentes ocurridos en el crecimiento y combinación celulares durante el período de formación embrionaria) es muy pequeño en relación con el tamaño que puede alcanzar el crecimiento monoclonal. Nosotros así lo hicimos estudiando más de 1000 muestras, del menor tamaño posible, recogidas en las porciones internas de la pared arterial normal y analizando la variación estadística de sus poblaciones celulares. Nuestros datos sugieren que el volumen de un islote celular, de un tejido normal, que contiene un solo tipo de enzima es de una diezmilésima de milímetro cúbico, aproximadamente; ello quiere decir que, probablemente, sólo contiene diez células. Por el contrario, una placa típica contiene un volumen de varios milímetros cúbicos.

En segundo lugar, debe excluirse la posibilidad de que la respuesta proliferativa de un simple proceso de reparación proceda de una sola célula. Hay varias razones para pensar que éste no es el caso. Las heridas curan gracias a la proliferación simultánea en toda la periferia de la lesión; puede observarse que, si se produce una pequeña lesión en la aorta, muchas células de la periferia se dividen simultáneamente. Además, el examen de los engrosamientos de la íntima que se observan en individuos de edad media o mayores, y que se consideran debidas a la repetición de pequeñas lesiones, demuestra que están formadas por poblaciones celulares mixtas.

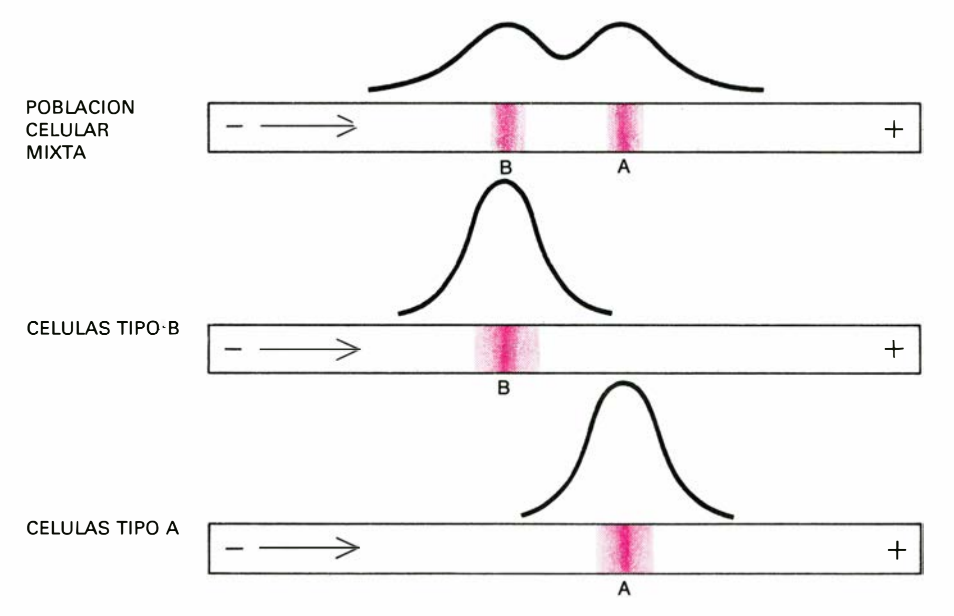
Algunos investigadores han sostenido que la presencia de un solo tipo celular en la placa de aterosclerosis puede explicarse por la existencia de un proceso que favorezca la proliferación de un tipo celular de los dos que consta el individuo "mosaico". Pero el hecho de que en un mismo individuo se encuentren regularmente lesiones que contienen sólo células del tipo *A* o del tipo *B*, indica que ningún tipo de enzima está produciendo una ventaja o desventaja selectiva.

Parece razonable admitir que las placas de aterosclerosis son monoclonales y postular que existe alguna circunstancia que confiere a una determinada célula algunas ventajas sobre sus semejantes, de modo que su progenie domine sobre las demás en el proceso normal de multiplicación por sustitución o de multiplicación estimulada de cierta especie. La causa comúnmente aceptada para explicar la aparición de esta ventaja selectiva en una célula del organismo es una alteración de su aparato genético, es decir, una mutación. Hemos descrito tres etapas en la patogenia de la aterosclerosis. En la etapa inicial se produciría la mutación de una célula de la pared arterial. A continuación, algunos factores o circunstancias facilitarían la expresión de este aumento selectivo de la capacidad de proliferación producida por la mutación y permitirían que la masa celular aumentara de tamaño. Es decir, que sería posible que la mutación no llegara nunca a formar una placa si no existiera algún otro factor que estimulara su multiplicación y confiriera a las células alteradas la oportunidad de realizar su capacidad anómala de crecer. Finalmente, aparece la etapa de las complicaciones; la tendencia de las células a degenerar y de las lesiones compuestas de dichas células a romperse y a ulcerar es compatible con la presencia de una población celular anómala.

Si este esquema general es correcto, debería considerarse como posibles causas de la aterosclerosis todas las capaces de provocar mutaciones o de favorecer la expresión de dichas mutaciones. Entre los factores desencadenantes podría incluirse circunstancias intrínsecas de tipo genético, que darían lugar a una tendencia excesiva a las mutaciones, y las extrínsecas, como los mutágenos químicos, los virus y, posiblemente, también las radiaciones ionizantes. Las circunstancias que pueden promover el desarrollo ulterior de las placas de aterosclerosis son las que favorecen la multiplicación celular, como son determinadas lesiones físicas o químicas. Los factores que participan en la tercera etapa, en la degeneración de la placa, todavía no se conocen con claridad.

El valor principal de la hipótesis monoclonal se debe a que aporta un esquema nuevo que permite plantear nuevos interrogantes acerca del papel que desempeñan los conocidos factores de riesgo: el fumar cigarrillos, los hábitos dietéticos, la alteración de los lípidos en sangre (de origen genético o dietético) y la hipertensión arterial; todos los cuales, según se ha visto, pueden aumentar la incidencia de enfermedad y ataques coronarios. ¿De qué forma se relaciona, por ejemplo, el hábito de fumar cigarrillos con la hipótesis monoclonal?

La combustión del cigarrillo produce sustancias químicas que son precursoras de productos cancerígenos, entre los que destacan los arilhidrocarburos, tales como el benzopireno y el metilco-

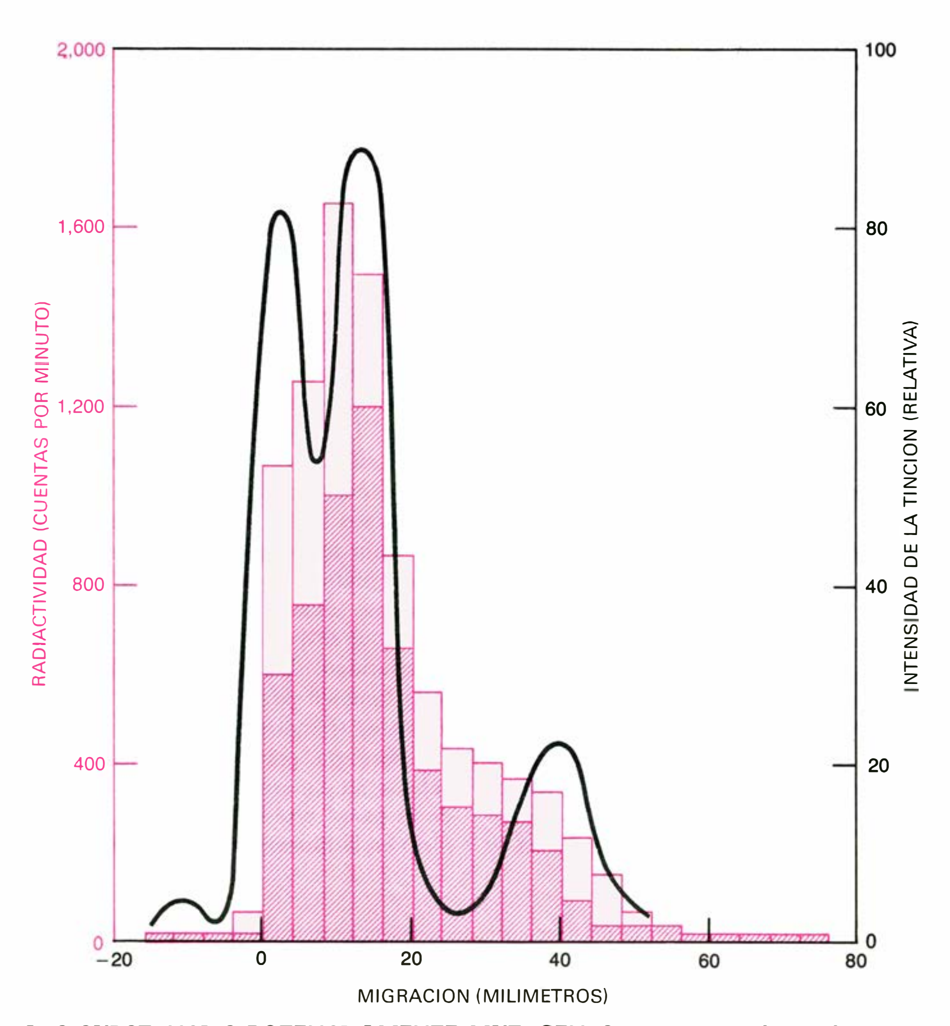


ESQUEMA ELECTROFORETICO que revela la presencia de dos poblaciones celulares con dos tipos enzimáticos. Las soluciones del enzima depositado en la membrana emigran a través de ésta *(flechas)* bajo la influencia de la corriente eléctrica. Pasados 50 minutos, se visualiza la posición de las bandas que corresponden a los enzimas *(color)*, haciendo que reaccionen con sustratos y precipiten un colorante. La presencia de dos bandas separadas muestra que existen dos tipos de enzima. La curva de la intensidad de dichas bandas *(curva negra)*, obtenida mediante fotómetro, nos permite estimar la proporción relativa de los dos enzimas y, por consiguiente, de los dos tipos celulares.

lantreno. El hecho de que el enzima arilhidrocarburo hidroxilasa, que convierte estas sustancias precancerígenas en cancerígenas, pueda ser inducido (producido en cantidades mayores) en el hígado y en otros tejidos cuando se administran estas sustancias, indica que pasan a la sangre y se distribuyen por los tejidos. ¿Qué elementos de la sangre trasportan estas sustancias nocivas? Hemos demostrado, mediante electroforesis, que son transportadas por las lipoproteínas de baja y muy baja densidad, que encierran la misma fracción proteica que transporta el colesterol. Se ha demostrado que el transporte de los arilhidrocarburos es tanto mayor cuanto más elevada es la concentración de lipoproteínas en sangre. ¿Adónde van estos arilhidrocarburos? Investigaciones llevadas a cabo en distintos laboratorios han comprobado que las lipoproteínas de la sangre constituyen un excelente medio nutritivo para los cultivos de células musculares lisas de la pared arterial humana. Junto con Mont Juchau y James Bond, pude confirmar que el sistema enzimático de la arilhidrocarburo hidroxilasa existe en la pared arterial de los conejos, de los monos y del ser humano, y que dicho sistema es inducido o activado por los arilhidrocarburos.

Todo esto significa que las células de la pared arterial pueden convertir en mutágenas las sustancias premutágenas que, procedentes del medio exterior, son transportadas hasta las células por las lipoproteínas sanguíneas. ¿Es posible que esto sea lo que ocurre en la realidad y constituya la verdadera causa de la aterosclerosis? Roy E. Albert y Martin Vanderlaan y sus colegas de la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York administraron dos conocidas sustancias cancerígenas, el benzopireno y el metilbenzantraceno, a los pollos, y provocaron el aumento del número y de la rapidez con que aparecían dichas placas en la aorta, sin que aumentara el nivel del colesterol en sangre. El mecanismo de la formación de la placa en los pollos no se ha podido reconstruir, pero los resultados son coherentes con la hipótesis monoclonal.

El colesterol, que es la pieza clave de la teoría de la insudación, encaja también en la hipótesis monoclonal. M. F. Gray, T. D. V. Lawrie y C. J. W. Brooks, de la Universidad de Glasgow, notaron la presencia de un derivado epóxido del colesterol en el suero sanguíneo humano y vieron que la concentración de dicho epóxido estaba aumentado en los individuos con un elevado índice de colesterol en sangre. Es sabido que el epóxido de colesterol puede producir tumores del tejido conjuntivo en las ratas y ratones, y podría ser que ésta y otras sustancias mutágenas que se forman en el organismo a partir del colesterol fueran las responsables de la estrecha correlación que existe entre el nivel de colesterol en sangre y la incidencia de la enfermedad coronaria. Resultaría muy interesante que pudiéramos estudiar la presencia de estas circunstancias cancerígenas en la sangre de los individuos pertenecientes a poblaciones con distinto grado de riesgo de aterosclerosis. Hemos empezado a hacerlo utilizando el método de detección de mutágenos bacterianos elaborado por Bruce N. Ames, de la Universidad de California, en Berkeley. También cabe recurrir al sistema de cultivo de células de mamíferos mediante el cual se puede detectar sustancias que lesionan el ADN, el material genético, y que, por consiguiente, tienen una elevada posibilidad de ser mutágenas para las células animales.



LAS SUBSTANCIAS POTENCIALMENTE MUTAGENAS son transportadas por la sangre por las mismas proteínas que transportan el colesterol. La curva en negro muestra el patrón electroforético de las lipoproteínas del suero sanguíneo humano. Los picos de la izquierda representan los quilomicrones y las lipoproteínas de baja densidad. El colesterol marcado radiactivamente, disuelto en el suero, migra principalmente con estas lipoproteínas *(franjas de color).* **Las muestras radiactivas de la sustancia precancerígena metilcolantreno se desplazan con las mismas lipoproteínas** *(rayado)* **que el colesterol, que son las que se trasladan a las células de la pared arterial.**

La presión arterial elevada, que es un factor importante de riesgo de aterosclerosis, podría ejercer un efecto químico o hidrodinámico que facilitara la multiplicación más rápida de las células de la pared arterial. En nuestro laboratorio, Stephen Schwartz está intentando identificar alguno de estos mecanismos. Recientemente, R. W. Pero y sus colegas de la Universidad de Lund, Suecia, encontraron que el ADN de los enfermos con hipertensión es más sensible al efecto de los mutágenos que el ADN de los pacientes cuya presión sea normal. Este hallazgo parece compatible con la prueba de que la incidencia del cáncer es superior en los individuos con hipertensión arterial. ¿Es posible que existan grupos de población humana con una mayor propensión a las mutaciones en un determinado tejido, como puede ser la pared arterial? La mayor propensión a las mutaciones, acompañada por la exposición a las sustancias ambientales potencialmente cancerígenas, puede in-

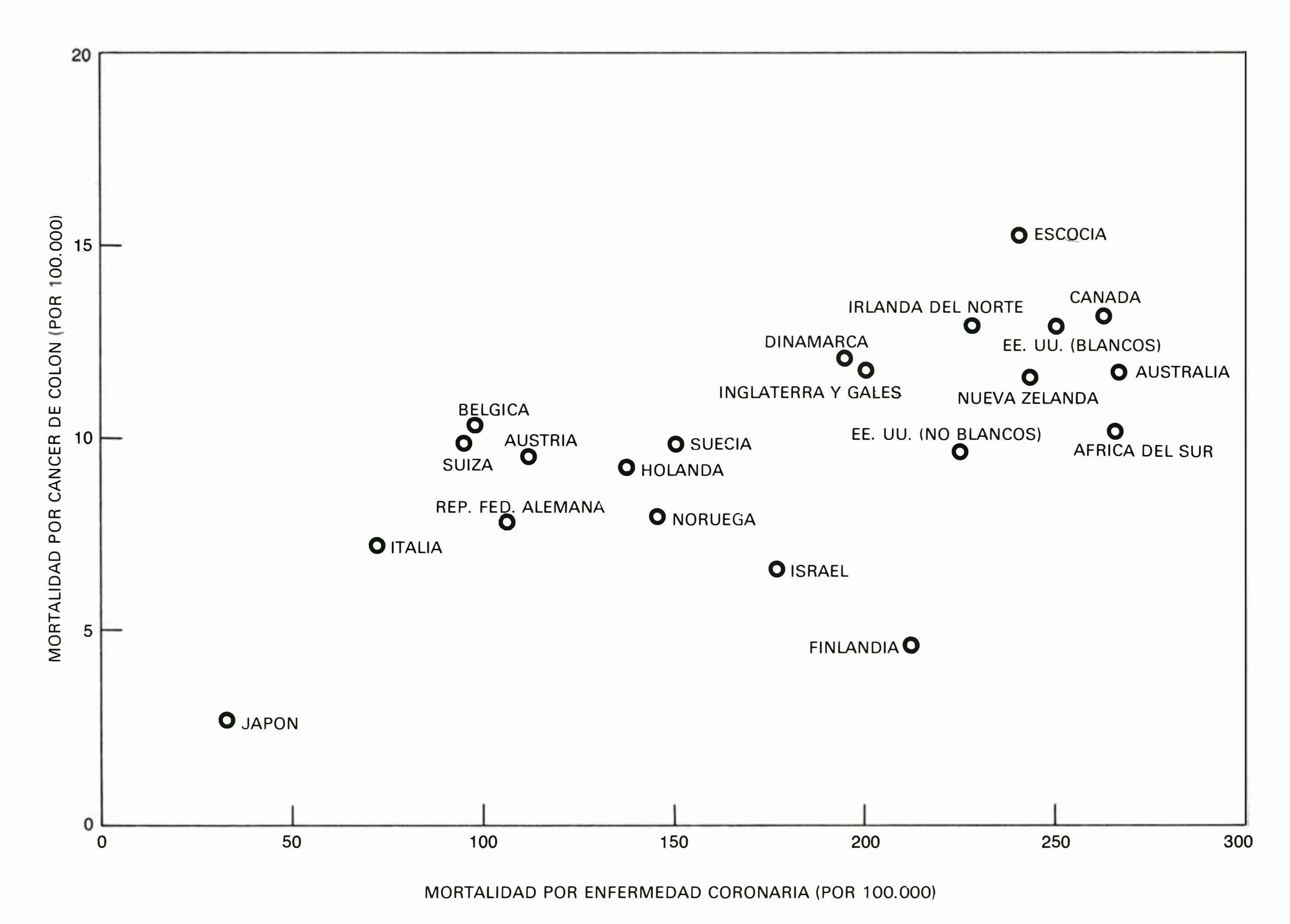
crementar la incidencia de la formación de las placas.

El epidemiólogo Ernest L. Wynder ha registrado la existencia de una correlación geográfica entre mortalidad por cáncer de colon y cardiopatía aterosclerótica *(véase la ilustración inferior de esta pág.)*. Dicha asociación puede obedecer a factores ambientales o genéticos, o a ambos a la vez. Se ha visto que existe por lo menos un factor dietético que se correlaciona con el cáncer y la aterosclerosis; en efecto, el cáncer de mama está estrechamente relacionado, a nivel mundial, con la ingesta dietética de grasas, una correlación que es semejante a la que existe con la mortalidad por aterosclerosis coronaria.

Ya he aludido a los ensayos terapéuticos realizados con estrógenos para prevenir las recurrencias de las crisis coronarias en los varones. Se parte de la prueba experimental en pollos y en la conocida observación de que las mujeres antes de la menopausia sufren menos accidentes coronarios y menos lesiones ateroscleróticas que los hombres, en tanto que dicha incidencia se eleva después de la menopausia. Cuando se estudió el efecto de los estrógenos en el hombre, en una investigación extensa y pormenorizada, denominada "Proyecto sobre drogas coronarias", no pudo demostrarse ningún efecto terapéutico positivo. Por el contrario, la mortalidad global en los varones a los que se recetaba estrógeno fue algo superior a la del grupo de control; en consecuencia, hubo que suspender el tratamiento. El grupo sometido a tratamiento con estrógenos mostró un aumento de la incidencia de cáncer. La teoría monoclonal da pie a una posible explicación de estos efectos producidos por los estrógenos.

Algunos de los pollos a los que Moss y el autor administraron un potente estrógeno sintético, el dietilestilbestrol, desarrollaron tumores del sistema linfático, efecto que se había observado también con anterioridad. Las placas de aterosclerosis también parecían ser peores en los animales tratados con dietilestilbestrol; descubrieron partículas virales en las células musculares lisas de las placas y de la pared arterial, algo que no habían visto en la inmensa mayoría de las muestras obtenidas en gran cantidad de animales no tratados con estrógenos. En experimentos iniciales, llevados a cabo en el Hospital Michael Reese, se encontró que la combinación de una dieta rica en colesterol y la administración de estrógenos daba lugar a que las placas espontáneas de los pollos se ulcerasen. Como se sabe, el dietilestilbestrol puede desencadenar rápidamente la proliferación de virus tumorales latentes en los ratones. Estas observaciones sugieren que la activación de los virus latentes quizá sea un mecanismo por el cual se inducen algunas de las complicaciones de la aterosclerosis humana.

La idea de que las placas ateroscleróticas pueden ser una forma de neoplasia o de proliferación anormal de los tejidos resulta sorprendente si el concepto de neoplasia se limita a los cánceres malignos, que se diseminan. Sin embargo, muchos tumores son benignos, permanecen localizados, crecen lentamente y pueden incluso regresar. En relación con este punto de vista, es interesante señalar que algunas teorías sobre



LA CORRELACION existente entre la mortalidad por cáncer de colon y por cardiopatía arteriosclerótica, indicada por la disposición más o menos lineal de los círculos en diagrama, sugiere que el cáncer y la aterosclerosis tienen, probablemente, un factor causal común.

el origen del cáncer postulan que hace falta que aparezcan varias mutaciones sucesivas para que se pierda por completo el control del crecimiento y sea viable la diseminación del tumor. Al parecer, las células que sufren los primeros cambios hacia el cáncer son mucho más numerosas que lo que se ha venido creyendo hasta ahora. E incluso un pequeño potencial de células, respecto de un crecimiento acelerado, tendría evidentemente unas consecuencias más graves en el estrecho confinamiento de una arteria que no en la piel, por ejemplo.

Continuamente está apareciendo nueva información sobre la biología de la pared arterial y de sus células, que puede ayudar a comprender cómo se produce dicha pérdida de control. Russell Ross y John A. Glomset y sus colaboradores de la Escuela de Medicina de la Universidad de Washington han encontrado, en las plaquetas de la sangre, una proteína, que facilita la multiplicación de las células musculares lisas, o de otro tipo, *in vitro.* Al parecer, coadyuva a estimular la proliferación celular en orden a reparar las lesiones. Podría pensarse que un paso en la evolución de la placa de aterosclerosis podría ser la pérdida, por parte de una célula, de su dependencia de esta proteína, de manera que dicha célula y sus descendientes se multiplicarían cuando no debieran, produciendo la masa celular que constituye la placa. Siguiendo una línea distinta de investigación, George M. Martin ha venido estudiando en nuestro departamento el envejecimiento de los cultivos de células de la pared arterial humana y animal. La rapidez del envejecimiento es diferente según la arteria de donde proceda. Las células procedentes de los segmentos de la aorta más propensa a la aterosclerosis envejecen con mayor rapidez. Este hecho puede ser una clave importante para explicar la distribución desigual de las placas de aterosclerosis, a lo largo de la pared arterial.

La naturaleza multifactorial de la aterosclerosis y sus complicaciones es evidente. La hipótesis monoclonal no simplifica por sí misma el problema de la identificación de las causas de las crisis cardíacas, pero sí enriquece, a mi modo de ver, la información y las ideas que se ofrecen al investigador. Con ello nos coloca en una mejor posición para estudiar y definir los múltiples factores, genéticos y ambientales, que son responsables de la epidemia actual de estas enfermedades, que no sólo acortan la vida humana si no que empeoran la calidad de nuestra población, cuyo promedio de vida es cada día más dilatado.

La separación de isótopos con láser

Los isótopos de un elemento, generalmente indistinguibles entre sí, se pueden separar bajo la luz monocromática de un láser. El proceso favorece su utilización en medicina, investigación y energía nuclear

Richard N. Zare

La mayoría de los elementos de la naturaleza son mezclas de isótopos; todos los átomos que constituyen a éstos poseen el mismo número de protones y electrones, pero diferente número de neutrones. En general, el hecho de que un elemento sea una mezcla de diversos tipos de átomos tiene poca importancia, debido a que los diferentes isótopos son indistinguibles entre sí por lo que respecta a la mayoría de sus propiedades. Ahora bien, precisamente por esta razón, cuando deseamos separar los isótopos de determinado elemento, la tarea puede resultar extremadamente difícil. Los resultados alcanzados en algunas investigaciones recientes acerca de la absorción de la luz láser por los isótopos de los elementos y por los compuestos que contienen tales elementos se muestran muy prometedores en el sentido de que dicha separación sea en el futuro más fácil y económica.

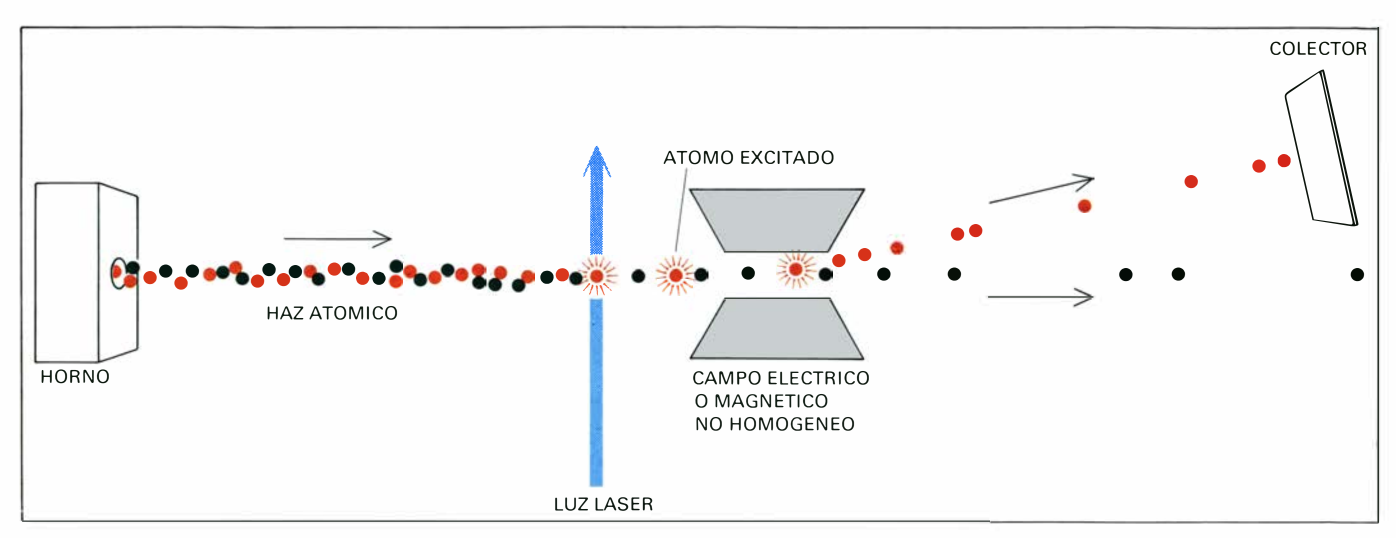
Cuando se procede a aislar un elemento de un compuesto, o mezcla de elementos, es común basarse en las diferencias de las propiedades químicas de los átomos. Estas propiedades vienen determinadas, casi por completo, por las nubes electrónicas que rodean el núcleo. Los átomos de cada elemento poseen un número característico de electrones. Por otro lado, los isótopos de un elemento dado poseen nubes electrónicas virtualmente idénticas: los electrones se presentan en igual número y difieren sólo muy ligeramente en su configuración electrónica. En consecuencia, la separación de isótopos por métodos de extracción química de una sola etapa no resulta factible en la práctica.

La separación de isótopos por extracción química repetida es posible en el caso de isótopos de elementos muy ligeros; si bien, para todos los elementos más pesados que el oxígeno, sólo se han desarrollado métodos físicos de separación. Tales métodos físicos dependen, en última instancia, de las pequeñas diferencias de los valores de las correspondientes masas atómicas, que tienen su origen en el diferente número de neutrones existentes en los respectivos núcleos. El más conocido de estos métodos es la difusión gaseosa; en ella, los isótopos se distinguen entre sí por las diferentes velocidades con que se difunden a través de un tabique poroso: los átomos más ligeros pasan a través del tabique con mayor celeridad que los átomos más pesados. La centrifugación gaseosa, la destilación múltiple y la separación electromagnética se basan en otras propiedades que dependen de la masa atómica. Todos estos métodos son laboriosos y engorrosos, lo que lleva consigo el que los productos de la separación –elementos isotópicamente puros o enriquecidos– sean sumamente caros. El uranio enriquecido, que se utiliza como combustible en los reactores de fisión nuclear, es el más importante de esos productos; otros isótopos, empleados en pequeñas cantidades en la investigación, en la medicina y en otros campos resultan todavía mucho más caros.

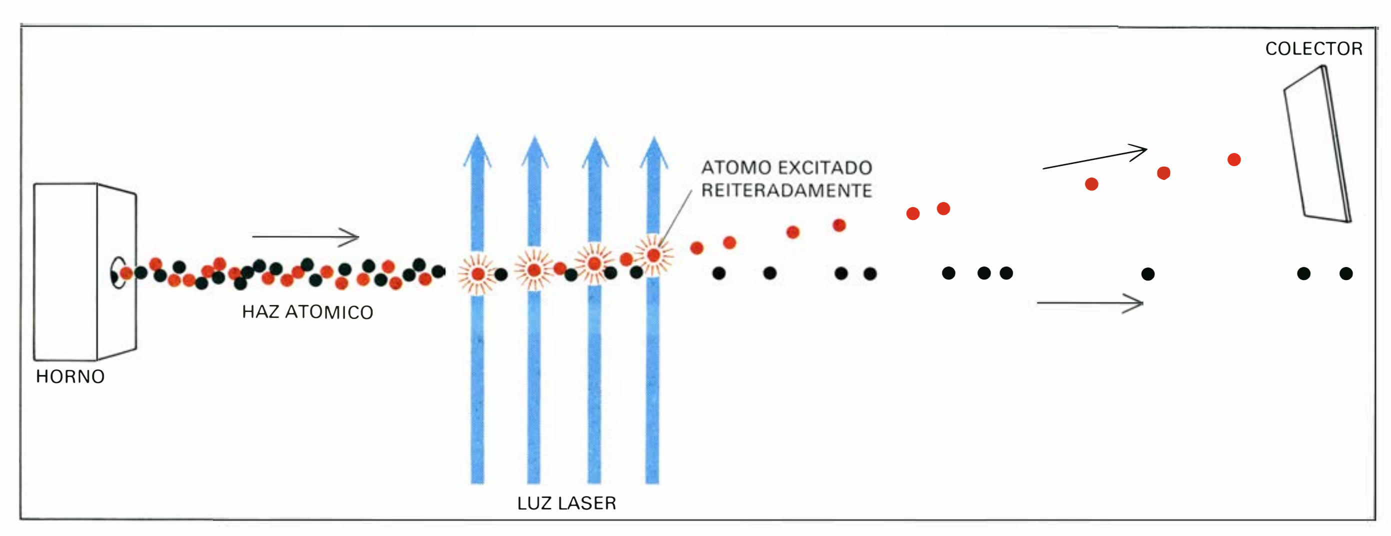
La separación de isótopos mediante un láser difiere fundamentalmente de todos los otros métodos conocidos. Este último método permite distinguir los átomos de los diferentes isótopos o los compuestos que contienen diferentes isótopos, no ya según sus distintas masas, sino gracias a la existencia de sutiles diferencias en las respectivas estructuras electrónicas. Aun cuando tales diferencias son muy pequeñas, afectan a las longitudes de onda de la luz absorbida por una sustancia; la luz que absorbe cada isótopo es de un color ligeramente diferente. Dado que un láser emite luz de color muy puro, se puede emplear para "marcar" los átomos o compuestos de un isótopo dado, al tiempo que deja inalterados a todos los restantes.

Un principio fundamental de la mecánica cuántica establece que un átomo o una molécula puede absorber energía solamente en unidades discretas. Ello es así debido a que los átomos poseen únicamente un número finito de estados discretos de energía, cada uno de los cuales representa una configuración particular de sus nubes electrónicas. Los átomos pueden pasar bruscamente de un estado a otro absorbiendo o emitiendo una energía determinada, pero las energías intermedias están prohibidas.

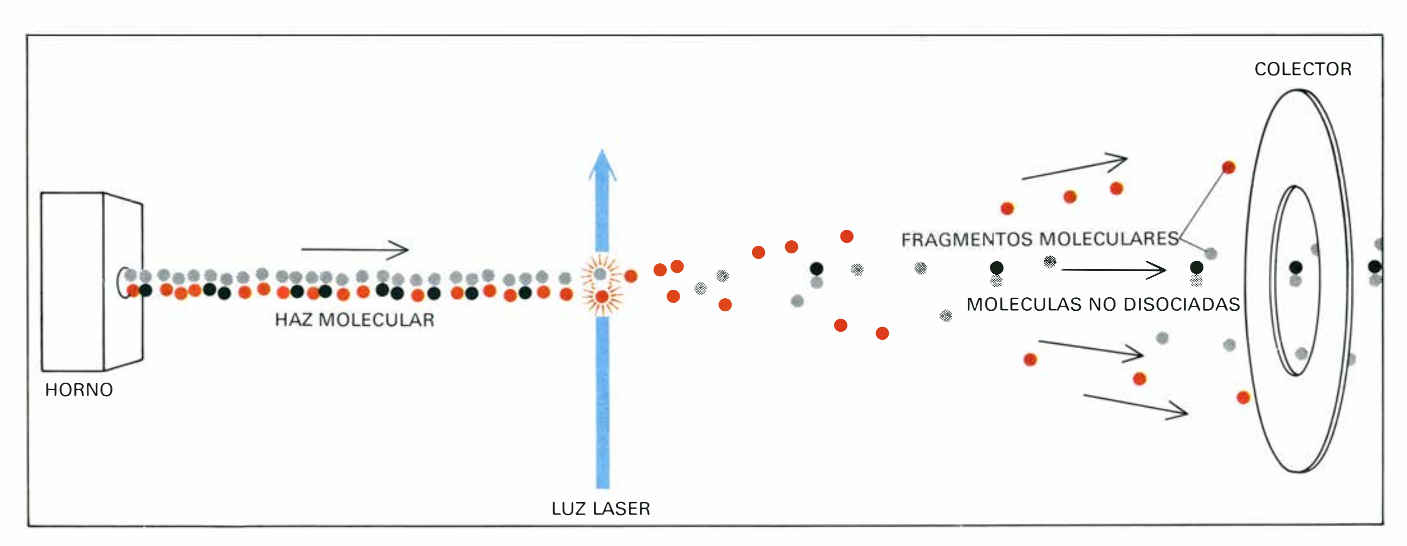
LA EXCITACION SELECTIVA CON LASER de dos isótopos de iodo molecular (I_2) se demuestra en un experimento realizado por Douglas M. Brenner y Saswati Datta en el laboratorio del autor, en la Universidad de Columbia. El láser, parte del cual puede verse a la derecha de la figura, emite luz en una banda estrecha de longitudes de onda, aunque el espectro es lo suficientemente amplio como para que esa luz sea absorbida por los dos isótopos del iodo. El haz del láser atraviesa dos celdas de vidrio; en una de ellas existen moléculas en las que ambos átomos de iodo tienen una masa atómica 127 *(izquierda),* en tanto que la otra contiene moléculas de iodo cuyos átomos tienen una masa 129 *(centro).* En la fotografía superior, la luz resulta absorbida por los gases encerrados en las dos celdas. Cuando una molécula absorbe un fotón, o cuanto de luz, pasa a cierto estado excitado; a continuación, libera la correspondiente energía reemitiendo fotones, que son observados como fluorescencia, en forma de una línea de luz naranja a través del centro de cada celda. En la fotografía inferior, se ha insertado una celda adicional *(derecha)* que contiene iodo 127 molecular en la cavidad del láser, con lo cual se elimina la salida del láser precisamente para las longitudes de onda absorbidas por las moléculas de iodo 127. En consecuencia, el iodo 127 de la celda externa no es estimulado; únicamente el iodo 129 absorbe la luz del láser.



LA DESVIACION DE ATOMOS EXCITADOS es, quizás, el método más directo de separación de isótopos con ayuda de un láser. Los átomos, una mezcla de dos isótopos *(puntos negros y puntos en color)*, emergen de un horno para formar un haz atómico. Los átomos se irradian luego mediante un láser, ajustado de modo que pueda excitar los átomos de un isótopo pero no los de otro. Las propiedades eléctricas y magnéticas de los átomos excitados son frecuentemente diferentes de las propiedades eléctricas y magnéticas de los átomos en su estado de más baja energía. Por tanto, los átomos excitados pueden extraerse del haz mediante un campo eléctrico o magnético no homogéneo.



LA PRESION DE RADIACION de absorciones reiteradas de fotones puede utilizarse también para separar una especie isotópica. De nuevo, el láser se ajusta de forma tal que se excite un isótopo, pero en este caso el estado excitado decae rápidamente (por fluorescencia), con lo que muchos fotones pueden resultar absorbidos durante el corto intervalo de tiempo que dura el tránsito de los átomos en cuestión a través del haz del láser. Con cada fotón absorbido, el átomo adquiere un pequeño incremento de momento; así, se va separando gradualmente del haz atómico



EL RETROCESO DE MOLECULAS DISOCIADAS representa un tercer método de separación de isótopos por desviación. Las moléculas, constituidas por un elemento que tiene dos isótopos *(puntos negros y en color)* o por un elemento monoisotópico *(puntos grises)*, presentan bandas de absorción que dependen de su composición isotópica. El láser excita y disocia únicamente las moléculas que incluyen un isótopo *(color)*. Parte de la energía del enlace químico roto se invierte en separar los fragmentos entre sí; el fragmento más ligero *(color)* resulta desviado.

En particular, los átomos pueden llevar a cabo tales transiciones bruscas absorbiendo o emitiendo luz u otra radiación electromagnética. Resulta pura cuestión de conveniencia establecer si la radiación debe ser considerada como un flujo de partículas o como un sistema de ondas; las dos expresiones son formalmente equivalentes. Cada una de tales partículas, llamadas fotones, posee una determinada energía, que es inversamente proporcional a la longitud de la correspondiente onda. La energía de los fotones (y la longitud de onda) es independiente de la intensidad de la fuente luminosa; al aumentar tal intensidad, aumenta sencillamente el número de fotones. Dentro de la región visible del espectro, la energía o longitud de onda de un fotón se percibe como color.

La luz puede ser absorbida por la materia sólo si la energía de un fotón corresponde a la diferencia energética entre dos de los estados permitidos de un átomo; los fotones de otras energías no interaccionan con los átomos y, en consecuencia, se transmite la luz. Cuando un fotón es absorbido, provoca un cambio en la estructura electrónica del correspondiente átomo: un electrón individual resulta promocionado a un estado de mayor energía, y, entonces, se dice que el átomo ha alcanzado un estado excitado. Por término medio, el electrón excitado se encuentra más lejos del núcleo. La absorción de nuevos fotones (de energía o longitud de onda adecuada) puede llevar al electrón hasta niveles energéticos todavía más elevados; a medida que la energía aumenta, crece también la densidad de los estados permitidos. El último de estos niveles corresponde al límite de ionización, en el cual el electrón es arrancado del átomo; la ionización puede ser considerada como un continuo de estados permitidos.

Una vez que un átomo ha absorbido un fotón, puede liberarse de su energía de excitación de muy diversas maneras. La alternativa más simple consiste sencillamente en la emisión de un fotón con la misma energía con que fue absorbido; en esto consiste el proceso de fluorescencia. Algunos átomos excitados pueden decaer en un estado metastable, que subsiste como tal durante un tiempo relativamente grande antes de que la energía sea reemitida. La energía puede también disiparse por medio de una serie de pequeñas transiciones, y, de este modo, se convierte en energía cinética aleatoria o calor. En última instancia, el átomo retorna a su estado más bajo posible de energía: el estado fundamental. Puesto que un átomo puede ocupar sólo determinados estados energéticos, únicamente será capaz de absorber y emitir luz en forma de líneas muy estrechas de longitudes de onda netamente definidas, cada una de las cuales corresponde a determinada transición atómica. El conjunto de todas estas líneas constituye el espectro característico del átomo considerado.

Del mismo modo que los átomos, las moléculas poseen estados electrónicamente excitados. Además de éstos, las moléculas presentan también otros estados energéticos vibracionales y rotacionales, que corresponden a los diferentes modos posibles de oscilación y rotación de los átomos que las constituyen respecto a su centro de masas. Las transiciones entre los estados vibracionales están también asociadas con la absorción y emisión de radiación electromagnética, aunque las longitudes de onda involucradas en estos últimos procesos son generalmente mayores que las relativas a los espectros atómicos. La mayoría de las transiciones entre los niveles energéticos electrónicos de los átomos o las moléculas se sitúan en la región visible y ultravioleta del espectro, en tanto que las transiciones entre los estados vibracionales moleculares corresponden al infrarrojo.

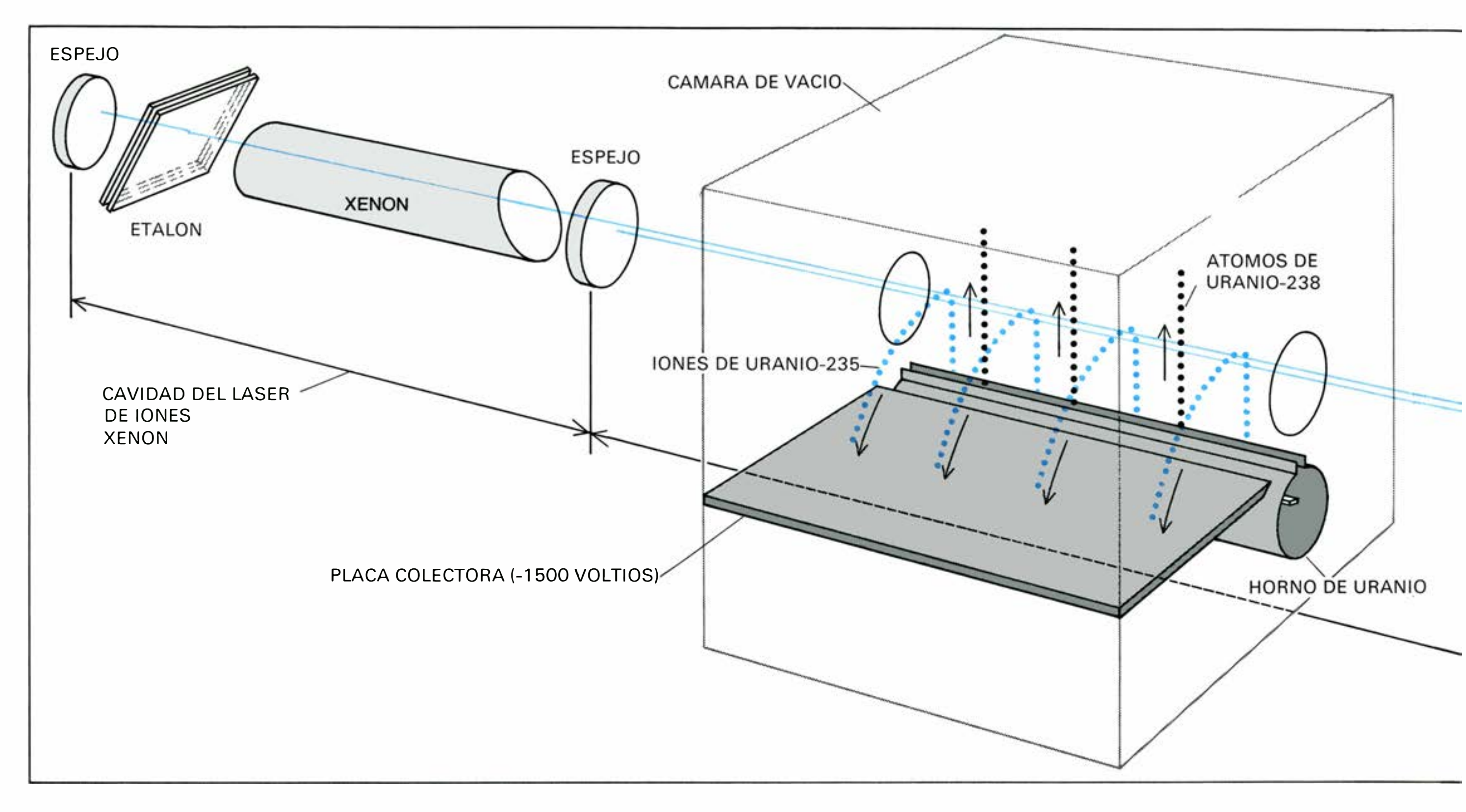
Los espectros característicos tanto de átomos como de moléculas resultan sutilmente influidos por los detalles de la estructura nuclear. Los electrones están ligados a un átomo en virtud de la carga positiva del núcleo, y sus movimientos vienen determinados fundamentalmente por el número de protones que existen en el núcleo. Sin embargo, los neutrones influyen también en la nube electrónica; al variar el número de neutrones se modifica la masa, el volumen y la forma de los núcleos, y todo ello produce ligeras alteraciones en la trayectoria de un electrón. Las diferencias en la masa de los núcleos pueden ocasionar efectos algo más importantes en las moléculas, puesto que se producen variaciones en la frecuencia de los estados vibracionales. Aunque todos estos efectos son pequeños y no se manifiestan en la mayoría de las interacciones de la materia, resultan cruciales en relación con la separación de isótopos con láser. Tales efectos proporcionan a cada isótopo de un elemento dado y a cada molécula compuesta por diferentes isótopos un conjunto diferente de niveles energéticos, con lo cual se originan pequeños corrimientos en los correspondientes espectros de absorción y emisión.

Se han propuesto varios métodos para la separación de isótopos con láser, pero todos ellos se basan en un mismo principio: un conjunto de átomos o moléculas que contiene más de un isótopo se irradia con un láser cuya longitud de onda se ha ajustado de forma tal que sea capaz de excitar los átomos de determinado isótopo y que no tenga efecto alguno sobre los restantes. De este modo, las distintas especies atómicas se pueden diferenciar entre sí. Por otra parte, existen diversos métodos para llevar a cabo el proceso ulterior de separación.

La luz láser desempeña un papel fundamental en esta técnica; ninguna otra fuente luminosa produciría los mismos resultados. Los láseres actúan aprovechando las transiciones mecánico-cuánticas que tienen lugar entre los diferentes niveles energéticos de los átomos y las moléculas. En un láser, una proporción importante de todos los átomos presentes en determinada población de átomos resulta promocionada al mismo estado excitado; los átomos retornan a un estado de inferior energía emitiendo luz coherentemente, es decir, en fase. La coherencia resulta garantizada gracias a la reflexión de una parte de la luz entre dos espejos, hacia atrás y hacia delante, de tal manera que dicha luz atraviese repetidamente el medio del láser, estimulando la radiación de los respectivos átomos conforme pasa. Los dos espejos constituyen una cavidad resonante, que podemos considerar como una especie de tubo de órgano para la luz. En algunos casos se puede "afinar" la cavidad para así ajustar la longitud de onda de la luz emitida.

En particular, son dos las propiedades que justifican la utilización del láser en el trabajo de separación de isótopos. En primer lugar, el láser puede producir una luz de alta intensidad, es decir, un haz con un gran flujo de fotones; con fuentes más débiles, la separación sería posiblemente demasiado lenta como para resultar práctica en la realidad. En segundo lugar, puede conseguirse que la luz del láser sea altamente monocromática, de forma que todos los fotones emitidos tengan casi la misma energía. La emisión según un intervalo estrecho de longitud de onda es fundamental para la excitación de un isótopo y la exclusión de otros, puesto que las líneas espectrales de los diferentes isótopos se presentan generalmente muy próximas entre sí.

Las diversas propuestas de separación de isótopos con láser difieren básicamente en el método utilizado en la extracción de los átomos o moléculas seleccionados, una vez han sido excitados por el láser. Una de las técnicas más directas al respecto se basa sencillamente en las diferencias existentes entre ciertas propiedades físicas intrínsecas de los estados excitados y del estado fundamen-



LA IONIZACION SELECTIVA de los átomos se ha utilizado en el enriquecimiento del uranio con láser según una técnica desarrollada en el Lawrence Livermore Laboratory. Dos láseres, uno de los cuales opera con un medio de iones xenón y el otro con iones kriptón, se disponen según un eje común; un haz de átomos de uranio se hace llegar entonces a la cavidad del láser de iones kriptón. Mediante un dispositivo que estrecha la anchura de banda de un láser (etalón), el láser de xenón se ajusta de forma tal que su longitud de onda corresponde a la de una de las lineas de absorción del isótopo uranio 235. De este modo, los átomos de uranio 235 se promueven hasta un cierto estado excitado,

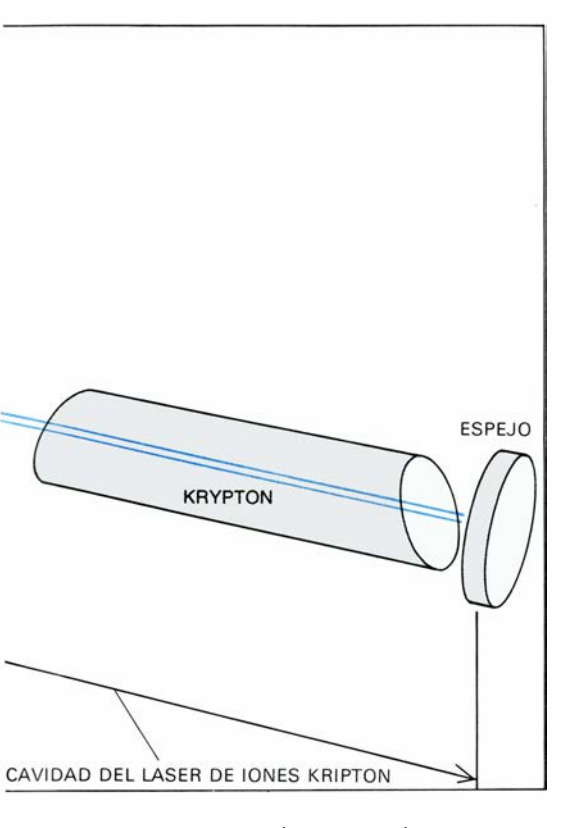
tal. Por ejemplo, la nube electrónica de los estados excitados de muchos átomos resulta más fácilmente distorsionada por un campo eléctrico o posee un momento magnético mayor que la nube electrónica del estado fundamental.

Generalmente, para llevar a cabo las experiencias de separación de isótopos resulta conveniente la utilización de un haz atómico, es decir, un caudal de átomos tales que todos se muevan en una misma dirección y con velocidades muy próximas entre sí. El haz se origina por evaporación de la sustancia en un horno situado en el interior de una cámara al vacío; los movimientos térmicos de los átomos que así se producen están distribuidos al azar, y su velocidad media viene determinada por la correspondiente temperatura. Los átomos que se mueven en determinada dirección emergen del horno a través de una pequeña abertura practicada en una de las paredes del mismo; el haz resultante puede ser colimado ulteriormente haciéndolo atravesar una serie de orificios emplazados adecuadamente con este fin, aunque ello traerá siempre consigo la disminución de la intensidad. Dado que el haz se mueve en el vacío, las colisiones que podrían perturbar el movimiento en línea recta de los átomos son mínimas. La misma técnica permite preparar haces de moléculas.

Consideremos cierto elemento A, constituido por dos isótopos A_1 y A_2. La realización de una experiencia de separación de isótopos por deflexión de átomos excitados se inicia con la obtención de un haz de dicho elemento. Cuando el haz en cuestión se irradia con un láser ajustado en relación con algún nivel del espectro del isótopo A_1, muchos de los átomos A_1 sufren una transición a tal estado excitado (que representaremos mediante la notación A_1*), en tanto que la mayoría de los átomos A_2 permanecen en el estado fundamental. De este modo los átomos A_1* resultan claramente rotulados y pueden ser separados del resto. La separación se lleva a cabo haciendo pasar el referido haz atómico a través de un campo eléctrico o magnético no uniforme, el cual producirá la desviación de los átomos que sean más fácilmente polarizados o que posean un momento magnético mayor. Los átomos desviados son finalmente recogidos, por ejemplo, por condensación sobre una superficie fría. Se destaca que la deflexión en el campo no homogéneo no constituye la fase fundamental de este proceso; dicho campo produciría tal efecto tanto para los átomos A_2* como para los átomos A_1*. Los isótopos se separan realmente en virtud de la excitación selectiva de la especie A_1 con el láser.

Para que todo este proceso se vea coronado por el éxito deben cumplirse dos condiciones: por una parte, es necesario que una proporción significativa de todos los átomos A_1 resulte afectada por el láser y, por otro, el correspondiente estado excitado debe persistir durante un tiempo suficiente como para que el citado campo produzca una desviación apreciable. Desgraciadamente, estos dos requisitos son contradictorios. Se puede lograr que la proporción de los átomos que sufren una transición determinada sea elevada, únicamente si esa transición es altamente probable o favorecida, pero en tal caso la transición inversa, desde el estado excitado al fundamental, será también altamente probable. En otras palabras, si es muy probable que un átomo absorba un fotón de determinada longitud de onda, lo es también que emita tal fotón. Los estados excitados de los átomos decaen pronto por fluorescencia.

Una forma posible de resolver esta situación conflictiva podría consistir en iluminar el haz atómico con un segundo láser (o alguna otra fuente de energía), para lograr la conversión de los átomos excitados A_1* en especies metastables, de



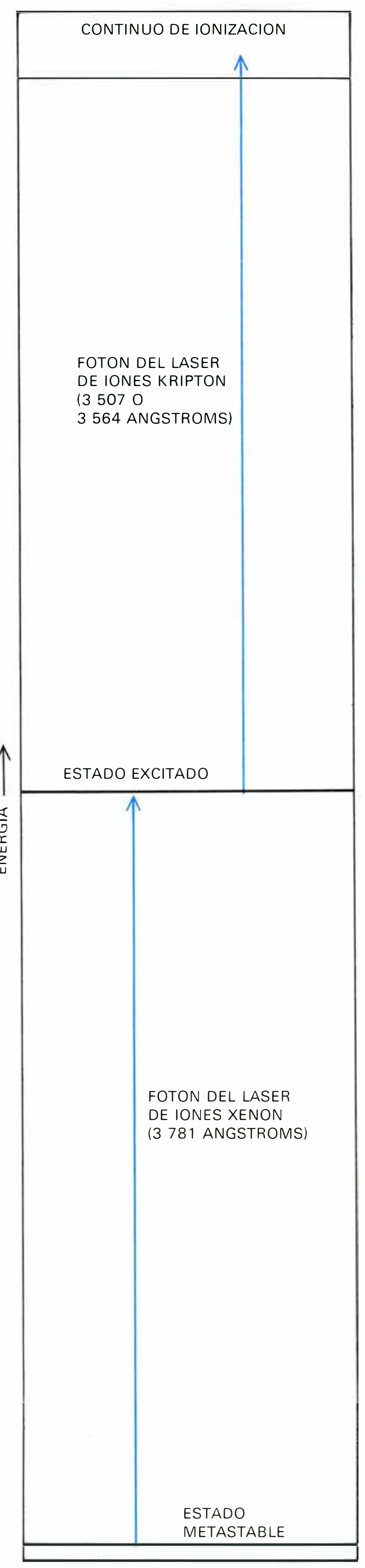
en tanto que los átomos del isótopo uranio 238, mucho más abundantes, no resultan afectados. Los átomos excitados pueden ser ionizados a continuación mediante el láser de iones kriptón; los átomos que no fueron excitados no serán ionizados.

vida más larga, a las que designaremos con el símbolo A_1^{**}. En general, estos átomos metastables presentan también propiedades eléctricas y magnéticas peculiares y podrían ser igualmente desviados a continuación.

Como alternativa, la corta vida media radiactiva de las especies excitadas A_1^* puede ser utilizada en un sentido favorable. En efecto, se puede separar a los átomos del haz gracias a la presión de radiación de la luz láser, haciendo que el láser interaccione con el haz atómico según un ángulo recto. Todo átomo que absorba un fotón sufrirá de este modo un pequeño incremento de momento que tenderá a separarlo de la fuente de láser. Dicho momento es proporcional a la energía de los fotones láser, pero como ésta es siempre muy pequeña, para que se produzca una deflexión apreciable, cada átomo debe absorber muchos fotones. La corta vida media de los átomos excitados constituye, por tanto, una cualidad esencial, puesto que éstos pueden retornar muy rápidamente al estado fundamental y, en consecuencia, pueden absorber un nuevo fotón del láser. Debería advertirse que siempre que cierto átomo excitado retorna al estado fundamental emitiendo un fotón, el átomo retrocede con un momento exactamente igual al que este mismo átomo gana cuando absorbe luz. Ahora bien, el momento de retroceso está orientado al azar y, por esta razón, tras sufrir muchos retrocesos, el momento medio originado por las correspondientes emisiones es nulo. El momento de los fotones láser absorbidos empuja siempre a dichos átomos en la dirección del haz del láser.

La primera aplicación satisfactoria de esta técnica fue dada a conocer en 1974 por Anthony F. Bernhardt, Donald E. Duerre, Joe R. Simpson y Lowell L. Wood, del Lawrence Livermore Laboratory. Estos autores prepararon un haz atómico de bario y procedieron a ajustar un láser a una línea del espectro del bario cuya longitud de onda es de 5535 angstroms, es decir, correspondiente a la región del verde del espectro visible. La absorción de un fotón único de esta longitud de onda cambia la componente tranversal de la velocidad de un átomo de bario en unos 0,8 centímetros por segundo. Este valor es aproximadamente 50.000 veces menor que la componente longitudinal de la velocidad de los átomos del citado haz; por tanto, resulta evidente la necesidad de procesos de emisión y absorción múltiples. El número de fotones que pueden ser captados viene limitado por el tiempo de tránsito de los átomos de bario en el seno del haz del láser, por el tiempo finito necesario para la pérdida del correspondiente estado excitado y, finalmente, por la pérdida de aquellos átomos excitados que no decaen en el estado fundamental sino a estados metastables, a partir de los cuales ya no pueden absorber nuevos fotones. Incluso en el mejor de los casos, la deflexión angular será muy pequeña, haciendo absolutamente necesaria la obtención previa de un haz atómico colimado.

El bario posee un total de 7 isótopos estables, de los cuales el más abundante, que constituye un 72 por ciento del elemento natural, es el isótopo cuyo número másico es 138. El número másico atómico es igual a la suma del número de protones (en este caso 56) y el núme-



LA IONIZACION del uranio se llevó a cabo, en Livermore, en dos etapas; una de ellas fue isotópicamente selectiva. Los átomos susceptibles de sufrir excitación con láser se hallaban en un estado metastable, situado un poco por encima del nivel energético más bajo posible, el estado fundamental. Los átomos de uranio 235 existentes en tal estado metastable fueron estimulados por el láser de xenón para promover su transición a un estado excitado; los átomos de uranio 238 no resultaron afectados. Cualquier átomo en un estado excitado podía ionizarse luego por absorción de un fotón con una longitud de onda inferior a 4400 angstroms. El láser de iones kriptón era capaz de ionizar átomos de cualquier isótopo de uranio.

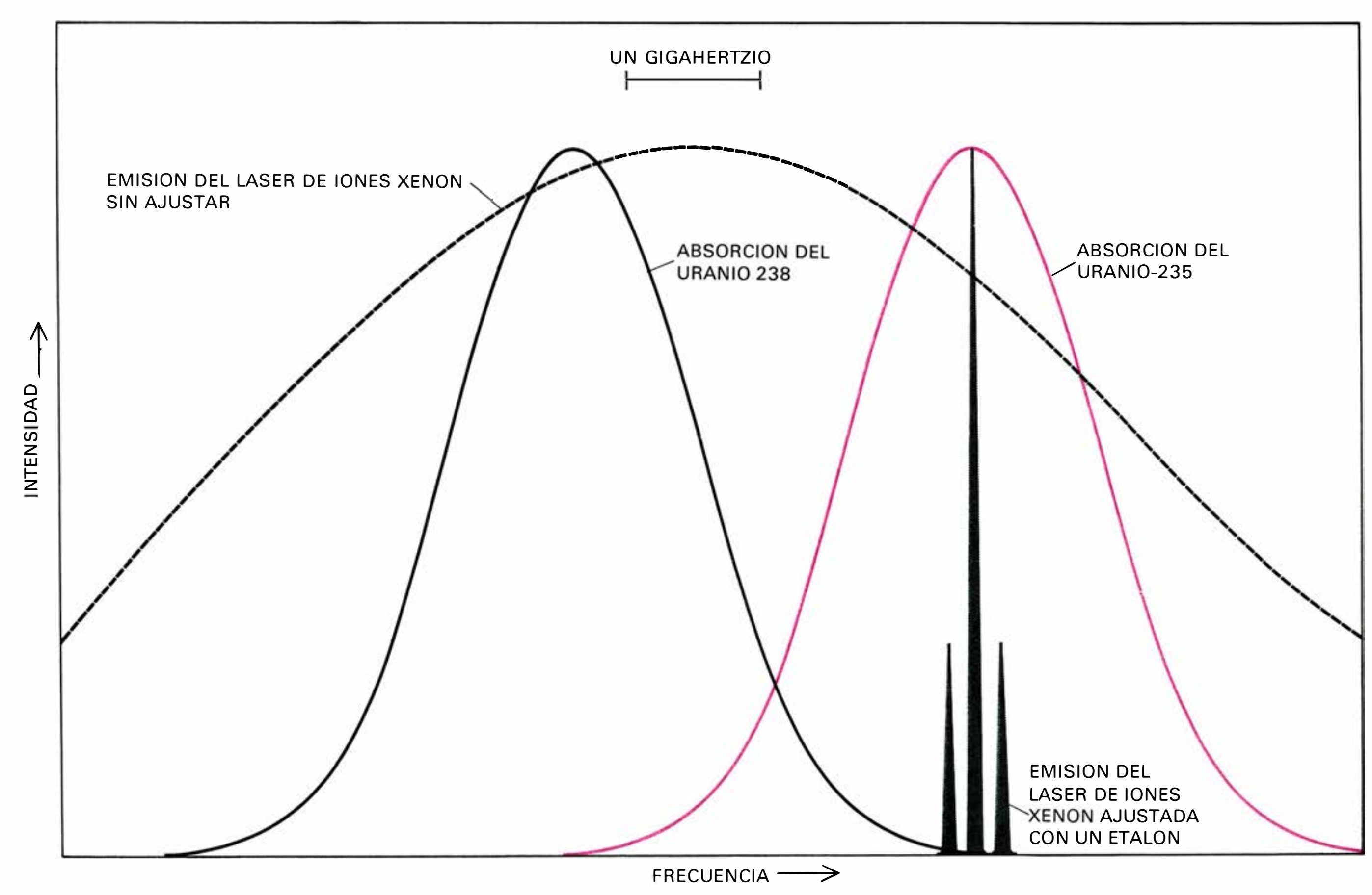
ro de neutrones (82) existentes en un núcleo. Por excitación selectiva, el grupo del Lawrence Livermore fue capaz de producir bario enriquecido con este isótopo por un factor de dos o tres.

Una desventaja de la citada técnica estriba en que requiere el uso de muchos fotones láser, todos de energía relativamente elevada, por cada átomo separado del haz. Un tercer método de separación por deflexión consigue superar esta dificultad mediante la obtención de parte de la energía requerida para el proceso de otra fuente: la ruptura, inducida por láser, de un enlace en una molécula.

La técnica se basa en la elección de una molécula que sea estable en el estado fundamental, y que se descomponga espontáneamente al ser promovida a un estado excitado. Con el fin de simplificar la exposición, vamos a suponer que la molécula es diatómica y se puede representar convencionalmente por los símbolos AB; supondremos también que A posee dos isótopos, A_1 y A_2. Si se procede a ajustar un láser de forma tal que excite únicamente aquellas moléculas que posean átomos A_1, solamente tales moléculas serán disociadas. La energía del correspondiente enlace químico se disipa entonces en forma de excitación interna de los productos y en su movimiento; el movimiento de retroceso, que es mucho mayor que el asociado con la absorción de fotones, desvía a los átomos respecto del haz. Este proceso proporciona la base para obtener una desviación significativa, aunque inducida originalmente por un fotón único. No existe una realización satisfactoria de esta técnica.

En lugar de producir una desviación de átomos excitados, aunque eléctricamente neutros, existe otro método de separación de isótopos basado en su conversión en iones, que se manejan siempre con mucho mayor facilidad. En efecto, la presencia de un campo eléctrico intenso puede barrer con eficacia todas las partículas cargadas que formen parte de un haz de átomos neutros, tal como se hace que un haz eléctrico barra la pantalla de un tubo de rayos catódicos. La ionización puede alcanzarse en dos etapas; en la primera de ellas, una especie isotópica es excitada selectivamente con un láser cuidadosamente ajustado, y, en la segunda, los átomos excitados son ionizados mediante otro láser menos preciso, o incluso utilizando otra fuente de energía diferente. La viabilidad del método quedó demostrada en 1974, fecha en que fue utilizado por un grupo de investigadores de la Universidad de Colonia para separar los isótopos del calcio y por otro grupo del Lawrence Livermore Laboratory para separar los isótopos del uranio. Se está estudiando su uso comercial.

En las experiencias de Colonia y Livermore se consiguió solamente separar cantidades microscópicas de material, pero hay razones para creer que se puede ampliar la escala de las técnicas y dispositivos utilizados. Sam A. Tuccio, Richard J. Foley, James W. Dubrin y Oscar H. Krikorian, de Livermore, consiguieron, en 1975, el enriquecimiento del uranio en cantidades de algunos miligramos; subsiguientemente, se puso de manifiesto que un trabajo similar a éste había sido iniciado con anterioridad por Richard H. Levy y G. Sargent Janes, en el Laboratorio de Investigación Avco Everett. Las empresas Avco Everett y Exxon Corpo-

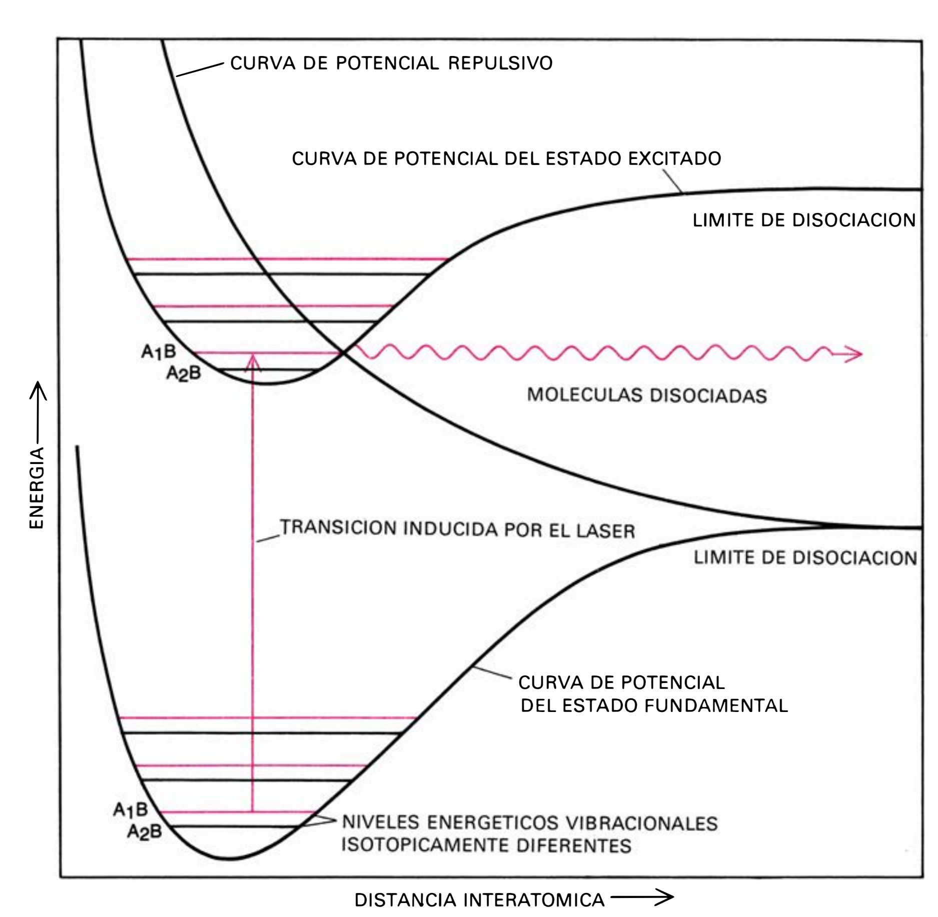


EL ESPECTRO DE ABSORCION de los isótopos de uranio se puede ajustar muy exactamente con un espectro de emisión de un láser de iones xenón. Dicho espectro de absorción incluye dos picos adyacentes, de los cuales el de mayor frecuencia (o de menor longitud de onda) representa la absorción del uranio 235. El espectro de emisión natural del láser es, proporcionalmente, más amplio, y abarca los picos de absorción de ambos isótopos, por lo que no resultaría adecuado para proceder a su discriminación. La emisión del láser se puede estrechar insertando un etalón en la cavidad correspondiente; la utilización de este dispositivo restringe el láser a unos escasos modos de resonancia, dando lugar a un espectro muy estrecho. La emisión limitada se puede ajustar entonces de modo que coincida con el máximo de absorción del uranio 235.

ration están construyendo actualmente una instalación experimental para el enriquecimiento de uranio en Richland, Washington. Aunque por razones de seguridad y secreto se desconocen muchos de los detalles de este proceso (tal como sucede en relación con otros métodos de separación de los isótopos del uranio), la mayor parte del trabajo de Livermore sí ha sido publicada.

En los experimentos de Livermore, un haz de átomos de uranio emerge de un horno a una temperatura de 2600 grados Kelvin. A esta temperatura, el 45 por ciento de los átomos se encuentran en el estado de energía más bajo posible y el 27 por ciento se encuentran en un estado metastable de energía sólo ligeramente superior. (Este estado metastable no es un nivel excitado propiamente dicho y no puede ser alcanzado por transiciones radiactivas, sino que se forma por desdoblamiento del estado fundamental en ciertos subniveles, dando lugar a una "estructura fina" del espectro atómico.) Sólo los átomos existentes en dicho estado metastable son excitados y finalmente ionizados y aislados.

La excitación se lleva a cabo mediante un láser cuyo medio operativo es un gas de iones xenón. Su radiación tiene una longitud de onda de 3781 angstroms (en la región ultravioleta del espectro) y excita únicamente al isótopo más ligero y fácilmente fisionable del uranio, al que corresponde un número másico de 235, y sólo a los átomos de uranio 235 que se encuentran en el estado metastable de más baja energía. Los átomos de uranio 238, es decir, de su isótopo más pesado, no serán afectados, se hallen en estado fundamental o en estado metastable.



LA PREDISOCIACION DE MOLECULAS en fragmentos químicamente estables ofrece otra posibilidad para la separación de isótopos con el láser. La energía del enlace químico de una molécula es función de la distancia entre los átomos; la curva que expresa esta relación se conoce como curva de potencial. En una molécula estable, la curva de potencial presenta un mínimo cuando las fuerzas de atracción y de repulsión están equilibradas. Realmente, una molécula puede poseer una serie de curvas de potencial, cada una de las cuales está asociada con un estado energético diferente de los electrones, y algunas pueden carecer de mínimo estable; en tales curvas, la fuerza entre los átomos es siempre repulsiva. La absorción de un fotón láser puede inducir la transición de una curva de potencial a otra. Si esta curva de estado excitado se corta mediante un potencial repulsivo, la correspondiente molécula se puede disociar. El proceso se llama predisociación debido a que se produce para una energía inferior al umbral ordinario para la disociación en esa curva de potencial. Dicho proceso se puede hacer isotópicamente selectivo ajustando el láser de forma que únicamente una especie isotópica se promueva a la curva de potencial del estado excitado. Dentro de un potencial ligado hay un número finito de estados de vibración moleculares *(líneas horizontales)*, y las posiciones de estos niveles son algo diferentes para cada molécula isotópicamente diferenciada.

Para ionizar un átomo no se requiere una longitud de onda especial; bastará cualquier fotón con una energía suficiente para superar la barrera del potencial de ionización. En el caso que nos ocupa, los átomos de uranio excitados por el láser de xenón sólo precisan absorber otro fotón con una longitud de onda inferior a 4400 angstroms, para ser ionizados. Los fotones en cuestión los suministra un segundo láser, que utiliza iones kriptón en lugar de xenón, y que presenta dos líneas intensas de emisión cuyas longitudes de onda son 3507 y 3564 angstroms. Evidentemente, este segundo láser no es isotópicamente selectivo, puesto que por sí mismo será capaz de ionizar al uranio 235 y al uranio 238.

El estado excitado del uranio 235 posee una vida media corta (235 nanosegundos) y, en consecuencia, es importante que el segundo fotón sea suministrado inmediatamente después de ser excitado el átomo. Este requisito se alcanza disponiendo los dos láseres según un eje óptico común, con el haz de átomos de uranio dentro de la cavidad del láser de kriptón. Los átomos ionizados, de los cuales se ha extraído un electrón y, por lo tanto, están cargados positivamente, resultan atraídos por una placa colectora conectada a una tensión negativa de 1500 voltios, sobre la cual se depositan.

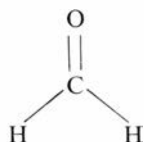
El sistema se hizo marchar de forma continua durante unas dos horas, con el láser de iones xenón funcionando a una potencia de 70 milivatios y el láser de iones kriptón a 30 vatios. La potencia, mucho mayor, del segundo láser se hacía necesaria para compensar las escasas probabilidades de que un determinado átomo excitado absorba un fotón y sea ionizado. El rendimiento resulta algo pequeño, por el hecho de que algunos átomos de uranio son ionizados térmicamente en el horno; este último proceso no es isotópicamente selectivo. Sin embargo, se llegó a obtener cuatro miligramos de uranio con un contenido del 3 por ciento de uranio 235. Este porcentaje supera por un factor de cuatro la abundancia del uranio 235 en el uranio natural y representa prácticamente el nivel de enriquecimiento que requieren los reactores nucleares.

Se han propuesto diferentes modificaciones en el método de ionización selectiva a que nos acabamos de referir. Por ejemplo, en lugar de un proceso en dos etapas, se pueden utilizar varios o incluso muchos fotones. Otra idea muy atractiva se basa en la creación de estados muy altamente excitados, situados muy poco por debajo del umbral de ionización, de forma tal que la etapa de ionización final exigiría solamente la utilización de un campo eléctrico débil o la existen-

cia de colisiones con partículas cargadas. Por otro lado, es necesario suprimir ciertos procesos parásitos. Los choques entre átomos de uranio 235 cargados positivamente y átomos de uranio 238 neutros pueden dar lugar a una transferencia de carga hacia el isótopo más pesado, y ello supondría una mezcla en el contenido isotópico del producto. La creación de una inversión de la población entre los átomos excitados de uranio originaría un problema todavía más grave: bajo determinadas circunstancias, los átomos podrían resultar estimulados a emitir radiación a medida que van cayendo a un nivel de menor energía. En otras palabras, el propio vapor de uranio podría convertirse en el medio de un láser. En cualquier caso, resulta evidente que todas estas experiencias representan sencillamente los primeros pasos hacia el desarrollo comercial de un nuevo método de separación de isótopos de uranio. Queda por ver si, en el futuro, este método en particular se convertirá o no en el más ventajoso desde el punto de vista económico.

Existe una técnica de separación de isótopos que resulta particularmente atractiva por su gran simplicidad: la descomposición de moléculas en productos estables que luego puedan ser fácilmente separados de la mezcla. No obstante, el método exige como requisito previo la existencia de una molécula que satisfaga una serie de especificaciones muy rigurosas: debe ser posible excitar la molécula con fotones láser, la molécula debe disociarse luego espontáneamente y los productos de la disociación deben ser estables, al objeto de que no se produzcan reacciones químicas ulteriores. Este requisito es particularmente difícil de satisfacer: muchas moléculas susceptibles de descomponerse por radiación electromagnética dan lugar a radicales libres, es decir, moléculas fragmentarias altamente reactivas.

Probablemente, la reacción más estudiada con fines de separación de isótopos sea la descomposición mediante láser de formaldehido gaseoso, una molécula orgánica cuya estructura es



Cuando el formaldehido se descompone por irradiación con láser puede dar lugar a dos conjuntos diferentes de productos, a saber, hidrógeno molecular (H_2) y monóxido de carbono (CO), o los radicales libres H y HCO. Los radicales libres son inestables y reaccionan muy rápidamente entre sí o con otras sustancias también presentes. Por otra parte, los productos moleculares son estables y podrían separarse fácilmente por medios químicos, con lo cual se mantendría inalterada cualquier composición isotópica que se pudiera obtener por excitación selectiva.

La fotoquímica de la descomposición del formaldehido es bastante compleja, pero parece ser que el rendimiento relativo de moléculas y radicales libres depende de la longitud de onda de la luz absorbida y, por consiguiente, el proceso es

LIMITE DE DISOCIACION

FOTON LASER VISIBLE O ULTRAVIOLETA

NIVELES ENERGETICOS VIBRACIONALES ISOTOPICAMENTE DIFERENTES

A_1B

A_2B

FOTON LASER INFRARROJO

ESTADO FUNDAMENTAL

LIMITE DE DISOCIACION

A_1B

A_2B

FOTON LASER INFRARROJO

ESTADO FUNDAMENTAL

LA ABSORCION MULTIPLE DE FOTONES constituye otro método de separar isótopos por disociación de moléculas. En un proceso en dos etapas *(izquierda)*, un fotón excita selectivamente a las moléculas que contienen un determinado isótopo; un segundo fotón disocia a continuación las moléculas excitadas. Generalmente, el primer fotón es infrarrojo, y produce una transición entre dos estados de vibración, en tanto que el segundo fotón corresponde a la región visible o ultravioleta del espectro. En otro procedimiento *(derecha)*, una molécula absorbe en rápida sucesión muchos fotones infrarrojos, aumentando su energía de vibración hasta que se rompe un enlace químico. Este método ha sido aplicado con éxito sólo en el caso de moléculas relativamente grandes constituidas por varios átomos; tales moléculas poseen muchos estados de vibración poco separados entre sí.

susceptible de manipulación experimental. Tres grupos de investigadores han informado ya que han usado con éxito este procedimiento para separar isótopos del hidrógeno.

El hidrógeno tiene dos isótopos estables. El más común de ellos posee un número másico 1 (^1H o, sencillamente, H), cuyo núcleo está constituido por un único protón; el otro, el deuterio (^2H o D), posee un número másico 2 y su núcleo consta de un protón y un neutrón. El formaldehido se puede preparar con hidrógeno puro (H_2CO) o con deuterio puro (D_2CO). Utilizando una mezcla constituida por cantidades iguales de estos dos gases, Edward S. Yeung y C. Bradley Moore, de la Universidad de California, en Berkeley, consiguieron, en 1972, el enriquecimiento del deuterio en una relación de seis a uno; con los mismos materiales de partida, otros investigadores alcanzaron una proporción de nueve a uno. En 1975, J. B. Marling, del Livermore, llevó a cabo la excitación selectiva del HDCO, es decir, una especie de formaldehido en el que están presentes ambos isótopos de hidrógeno; el contenido en deuterio de los productos de este proceso, en forma de HD, fue catorce veces mayor que en los materiales originales.

La disociación de las moléculas de formaldehido no se consigue a través de un proceso de excitación siguiendo hasta llegar al continuo de disociación. Si pretendiéramos utilizar con este fin fotones de energía suficiente, éstos serían absorbidos por todas las moléculas de formaldehido, sin selectividad isotópica alguna. La molécula se descompone al alcanzar una energía inferior según un proceso denominado predisociación. Dicha molécula alcanza un nivel específico en el que la fuerza existente entre los átomos que la constituyen puede cambiar de atractiva a repulsiva; aun cuando la energía suministrada sea inferior a la que se necesita ordinariamente para romper el enlace químico de la molécula en ese estado energético electrónico, la molécula se desintegra.

La separación entre el deuterio y el hidrógeno se ve facilitada por las diferencias, relativamente grandes, que existen entre los espectros de estos isótopos, y que pueden atribuirse al elevado valor de la relación entre sus respectivas masas atómicas. Aunque los isótopos del carbono y del oxígeno muestran corrimientos espectrales mucho menos importantes, también se ha conseguido recientemente su separación en la descomposición del formaldehido. John H. Clark, Yehuda B. Haas, Paul L. Houston y Moore, de la Universidad de California, en Berkeley, trabajando con los isótopos del carbono de masas atómicas 12 y 13, han conseguido aumentar la abundancia del carbono 12 en el monóxido de carbono hasta 81 veces su valor normal, con lo cual se obtiene un enriquecimiento del contenido de carbono 13 en el formaldehido no descompuesto. En el experimento a que nos estamos refiriendo, dichos autores utilizaron luz láser con una longitud de onda de 3032 angstroms, con la cual resulta predominante la creación de radicales libres. Con el fin de alcanzar los citados factores de enriquecimiento, se añadió a la mezcla de la reacción óxido nítrico, sustancia que presenta la propiedad de combinarse con los radicales libres. Más recientemente, Marling ha demostrado que la utilización de longitudes de onda superiores a los 3300 angstroms suprime la creación de radicales libres; al menos un 80 por ciento del rendimiento se obtiene en forma de productos moleculares. Este último autor ha podido enriquecer oxígeno 17 y oxígeno 18, ambos isótopos raros, además del carbono 13 y del deuterio. Es de destacar que Marling obtuvo enriquecimientos por un factor de tres o cuatro partiendo de formaldehido constituido por elementos en su abundancia isotópica natural. Cuando se está separando isótopos raros, la mayor parte del esfuerzo que exigen los métodos convencionales se invierte a menudo en lograr un nivel de enriquecimiento de unas pocas unidades porcentuales. Los resultados de Marling ilustran de este modo una de las ventajas potenciales que caracterizan la tecnología del láser: la obtención de elevados factores de separación para los isótopos raros en procesos de una sola etapa.

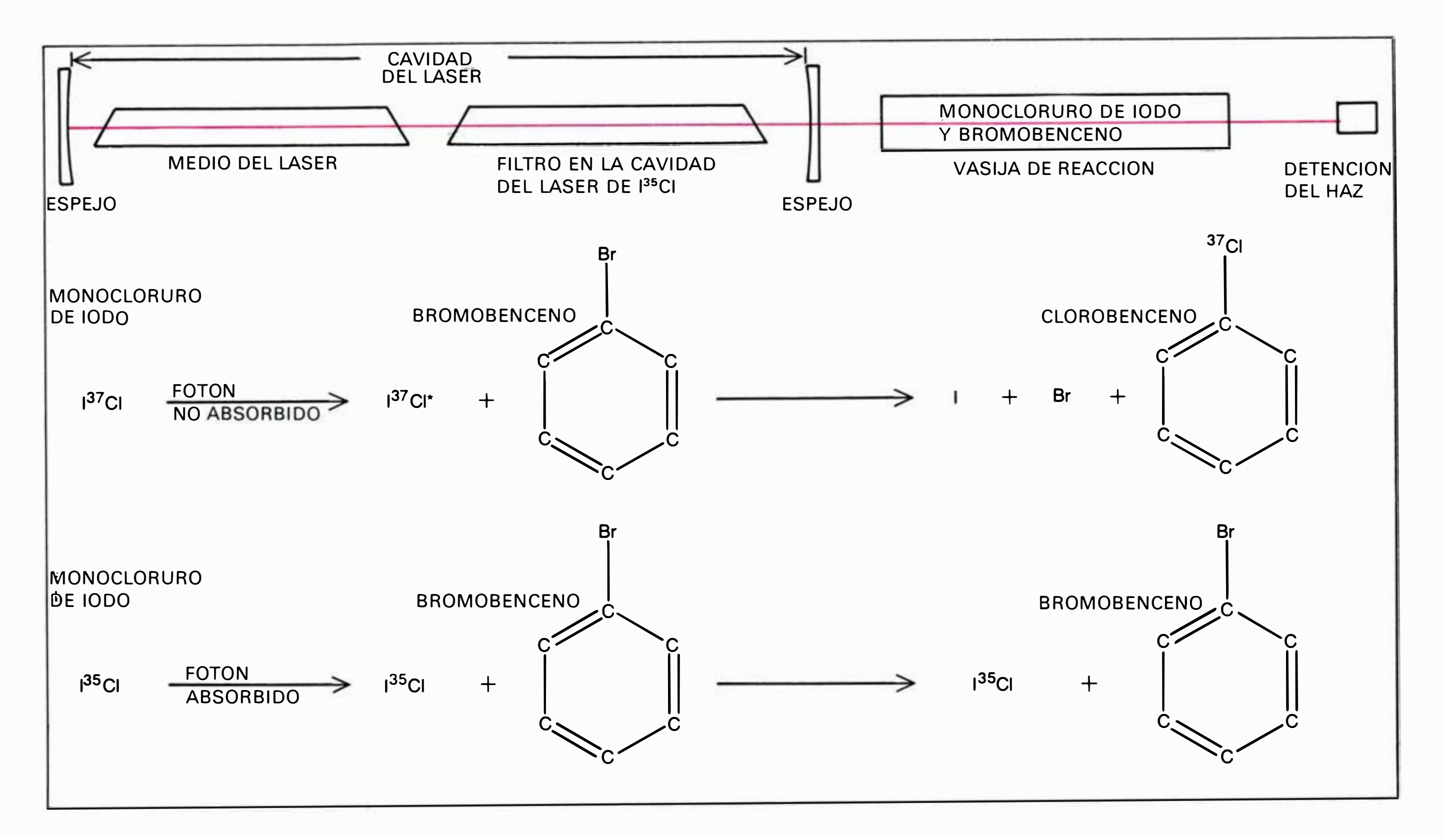
Además del formaldehido, los estudios llevados a cabo hasta ahora acerca de la separación de isótopos mediante el uso de métodos de fotodescomposición se han centrado sobre la tetracina simétrica, una molécula orgánica inestable con la siguiente estructura:

H
C
N N
N N
C
H

Cuando se procede a irradiar la tetracina, esta sustancia se descompone en dos moléculas de nitrógeno molecular (N_2) y otras dos moléculas de cianuro de hidrógeno (HCN). Robert R. Karl y K. Keith Innes, de la Universidad estatal de New York, en Binghamton, han demostrado que cada fotón absorbido por la tetracina conduce a la descomposición de una molécula. El proceso ha sido utilizado para separar los isótopos de hidrógeno, carbono y nitrógeno.

Robin M. Hochstrasser y David S. King, de la Universidad de Pennsylvania, han puesto de manifiesto también la posibilidad de conseguir un enriquecimiento isotópico a través de un proceso de fotolisis de la tetracina; sin embargo, su método difería de la mayoría de los utilizados en otros experimentos en un aspecto muy importante. En lugar de proceder a excitar a las moléculas en fase gaseosa, dichos autores irradiaron un cristal de tetracina simétrica enfriado a una temperatura de 1,6 grados Kelvin (1,6 grados centígrados por encima del cero absoluto). Si en estas condiciones el láser se ajusta a las características espectrales de moléculas con una composición isotópica dada, las moléculas seleccionadas resultarán totalmente descompuestas. La irradiación de dicho cristal durante unos pocos minutos produjo un enriquecimiento en el contenido de nitrógeno 15 y carbono 13 presentes en el mismo, por un factor de 1000 o más.

No todas las moléculas dan lugar a fragmentos estables como resultado de un proceso de predisociación; frecuentemente, es necesario trabajar con sustancias cuyas propiedades no resultan tan convenientes para el químico. En muchos casos, la disociación exige un proceso de dos fotones, en el cual, en primer lugar, la molécula en cuestión es excitada y, a continuación, se le induce a efectuar una segunda transición que la lleva al continuo de disociación o a otro estado excitado o metastable que se descompone. Un proceso en dos etapas como el que nos ocupa se está investigando en el Laboratorio Científico de Los Alamos, para la separación de los isótopos del uranio. En ese experimento, un fotón infrarrojo excita selectivamente a las moléculas de gas hexafluoruro de uranio que contienen un átomo de uranio 235, pero no a las que contienen el isótopo más pesado. A continuación, un fotón ultravioleta descompone las moléculas de $^{235}UF_6$ excitadas, pero no afecta a las restantes moléculas no excitadas. Los productos de la descomposición son $^{235}UF_5$ y flúor atómico; subsiguientemente, el $^{235}UF_5$ se separa del gas. Para ayudar a la excitación selectiva del $^{235}UF_6$, el espectro de absorción de la molécula se simplifica haciendo que el gas se expanda a través de una tobera, determinando su enfriamiento,



UN ELIMINADOR QUIMICO se utilizó en la separación de los isótopos del cloro en la Universidad de Columbia. El cloro natural, que posee dos isótopos estables con pesos atómicos de 35 y 37, se combinó con iodo para formar monocloruro de iodo (ICl). Este compuesto se mezcló a continuación con bromobenceno, la sustancia eliminadora, y finalmente se procedió a irradiar dicha mezcla gaseosa. El láser se ajustó de modo que excitara únicamente a las moléculas de monocloruro de iodo que contenían un átomo de cloro 37 (el compuesto en su estado excitado se escribe $I^{37}Cl^*$). El bromobenceno tiene la propiedad de reaccionar con los estados excitados del monocloruro de iodo, pero no con su estado fundamental. Como resultado, el cloro 37 se extrajo de las moléculas de $I^{37}Cl^*$ (formando finalmente clorobenceno), pero no de las $I^{35}Cl$.

sin llegar a la condensación del mismo.

En una nueva técnica, la disociación se logra mediante un proceso de absorción de muchos fotones infrarrojos de baja energía, en lugar de usar solamente uno o dos fotones de energía más elevada. Realmente, el descubrimiento de esta posibilidad constituye un hecho de enorme importancia para la separación de isótopos con láser. Un ejemplo de aplicación a este campo de trabajo lo tenemos en la separación de los dos isótopos del azufre, azufre 32 y azufre 34, a través de la descomposición de hexafluoruro de azufre (SF_6).

En otro experimento llevado a cabo por R. V. Ambartzumian y V. S. Letokhov, del Instituto de Espectroscopía de Moscú, se procedió a irradiar hexafluoruro de azufre con un láser pulsante de dióxido de carbono, capaz de suministrar una potencia de entre uno y dos mil millones de vatios por centímetro cuadrado. El láser se ajustó a una longitud de onda del infrarrojo que correspondía a un nivel de excitación vibracional del $^{32}SF_6$. Prácticamente, todo el $^{32}SF_6$ se descomponía en la irradiación y, en consecuencia, el gas residual se enriquecía en $^{34}SF_6$ por un factor del orden de 3000. Cuando se procedía a ajustar el láser a otra longitud de onda, de suerte que fuera capaz de excitar el $^{34}SF_6$, era esta molécula la que se descomponía. Resultados esencialmente análogos a los que acabamos de describir fueron obtenidos independientemente por John L. Lyman, Reed J. Jensen, John P. Rink, C. Paul Robinson y Stephen D. Rockwood, en Los Alamos.

Experimentos más recientes con haces moleculares han confirmado una conclusión preliminar en el sentido de que las moléculas del hexafluoruro de azufre se descomponen sin colisiones una vez han alcanzado una "escalera" de estados excitados vibracionales sucesivos que se extienden hasta el continuo de disociación. Este proceso todavía no se comprende bien, pero ya ha sido aplicado al enriquecimiento de isótopos de hidrógeno, boro, carbono, silicio, cloro, titanio, molibdeno, wolframio y osmio, tal como se ha expuesto para el azufre. Sin embargo, hasta el presente, dicho proceso sólo se ha observado en moléculas constituidas por más de tres átomos, lo cual parece sugerir que la alta densidad de estados excitados, característica de tales moléculas, es una cualidad necesaria para que la cadena de absorciones sucesivas de fotones continúe sin interrupción hasta lograr la disociación.

Los estados excitados de los átomos presentan generalmente mayor reactividad que los respectivos estados fundamentales. Esta propiedad característica sugiere otro método de separación de isótopos. Este consiste en añadir a la sustancia base un eliminador, es decir, una molécula que posea la cualidad de no reaccionar con el átomo o molécula que pretendemos separar cuando tal átomo o molécula esté en el estado fundamental; aunque, en cambio, se combine irreversiblemente con ellas cuando esté en un estado excitado. La búsqueda de tal eliminador ideal no es una tarea fácil, pero cuando se encuentra puede ofrecer ventajas muy considerables. Ya no se requeriría el uso de fotones adicionales, es decir, de energía adicional, para ionizar o disociar los estados excitados.

La eliminación química ha sido utilizada por Douglas M. Brenner y Saswati Datta, de la Universidad de Columbia, en la separación de los isótopos del cloro. El experimento a que nos referimos consistió en irradiar una mezcla de monocloruro de iodo (ICl) y bromobenceno (C_6H_5Br) con un láser que funcionaba con una longitud de onda de 6050 angs-

troms (correspondiente a la región rojo-naranja del espectro visible). A esta longitud de onda, el láser excitaba a las moléculas de monocloruro de iodo que contenían cloro 37, pero no a las que contenían el otro isótopo estable del cloro, el cloro 35. En las subsiguientes colisiones de las moléculas excitadas de $I^{37}Cl^*$ con el bromobenceno, esta sustancia asimilaba un átomo de cloro 37 para formar un radical intermedio inestable ($^{37}ClC_6H_5Br$), que rápidamente expulsa el bromo y conduce finalmente a un producto estable, el clorobenceno ($C_6H_5{}^{37}Cl$). Tras una irradiación de unas dos horas, se llegó a obtener algunos miligramos de C_6H_5Cl; esta sustancia presentaba un enriquecimiento en cloro 37 por un factor seis.

Una característica particular del trabajo de la Universidad de Columbia radicaba en el uso de un isótopo para ajustar el láser para excitar selectivamente otro isótopo. En la cavidad del láser se colocaba una muestra de $I^{35}Cl$ que, en virtud de un proceso de absorción, producía la extinción de la salida del láser, precisamente para aquellas frecuencias que excitarían al $I^{35}Cl$. Gracias al uso de este filtro interno, las moléculas de $I^{37}Cl$ fueron excitadas selectivamente sin necesidad de tomar medidas extraordinarias para estrechar la anchura de la línea de emisión del láser, y con el fin de circunscribirlo a una transición determinada del $I^{37}Cl$. El método ofrece así la posibilidad de conseguir la excitación selectiva de cierta especie isotópica sin necesidad de conocer con demasiado detalle su espectro.

El trabajo de la Universidad de Columbia ha demostrado también que la comprensión del mecanismo del eliminador puede hacer posible la preparación directa de compuestos marcados isotópicamente. Puesto que muchos isótopos se utilizan, no como elementos puros, sino en forma de compuestos, esta técnica podría aumentar la utilidad de la separación de isótopos con láser. De hecho, la investigación en el campo de la fotoquímica isotópicamente selectiva proporcionará métodos prácticos de separación de isótopos y marcado isotópico, y, además, puede ser el camino para desarrollar y comprender mejor la química de las reacciones entre estados excitados.

El interés general que suscita actualmente la separación de isótopos con láser se debe, en gran parte, a su posible empleo en la industria de la energía nuclear. Por el momento, la tecnología que se utiliza más ampliamente para el enriquecimiento del uranio es la difusión gaseosa. Una breve reseña de este proceso muestra el interés que tendría la creación de otras alternativas.

En una instalación de difusión gaseosa, se bombea vapores de hexafluoruro de uranio (UF_6) a través de un tabique poroso; el $^{235}UF_6$, más ligero, se difunde con mayor velocidad que el $^{238}UF_6$, más pesado, y, en consecuencia, el vapor transmitido se enriquece ligeramente en uranio 235. Como el enriquecimiento que se consigue en una sola etapa es muy pequeño, conviene utilizar centenares de etapas unidas en cascada; en este sistema, cada etapa se alimenta con el flujo enriquecido proveniente de la etapa inmediatamente anterior, junto con el vapor agotado que procede de la etapa siguiente. Para obtener una cantidad de UF_6 tal que contenga un kilogramo de uranio enriquecido al 3 por ciento de uranio 235, desechando UF_6 con un 0,2 por ciento de uranio 235, casi 1500 kilogramos de uranio natural deben entrar en la primera etapa de la cascada y, si se considera el proceso en su conjunto, será necesario bombear y hacer recircular más de dos millones de kilogramos de uranio a través de todas las etapas que constituyen la cascada. Se consume así una energía del orden de cinco millones de electrón voltios por cada átomo de uranio 235 separado.

El coste total de la obtención de un miligramo de uranio 235 con una pureza del 90 por ciento en un proceso de difusión gaseosa es de unos 2,3 centavos de dólar. Este coste resulta ventajoso en comparación con el coste de 1 a 10 dólares por miligramo que resulta para la mayoría de los demás isótopos con un enriquecimiento del 90 por ciento; pero un patrón de valor económico más familiar nos ayudará a demostrar que todos los isótopos purificados son muy caros: el precio actual del oro es de unos 0,3 centavos por miligramo.

En los Estados Unidos existen tres instalaciones de difusión gaseosa que pueden separar 3960 toneladas métricas de uranio 235 al 3 por ciento. La inversión de capital que exige una nueva instalación con una capacidad anual de unas 2050 toneladas de uranio 235 al 3 por ciento se estima en unos 3000 millones de dólares; y el coste anual de explotación ascenderá a unos 500 millones de dólares. Las estimaciones de la demanda de uranio enriquecido son inciertas, pero se cree que el consumo interior de dicho país exigiría un suministro equivalente a la capacidad de entre 4 a 8 nuevas factorías para finales de este siglo; la demanda del exterior podría duplicar o triplicar esta cifra. La adopción de otras técnicas de separación física, tales como la centrifugación gaseosa, podría reducir el coste de la separación de los isótopos del uranio entre un 10 y un 30 por ciento. Si se demuestra que la separación en gran escala con láser es posible, el ahorro sería todavía mucho mayor.

La energía necesaria para producir fotones visibles o infrarrojos destinados a la separación de isótopos con láser podría ser del orden de 1 a 10 electrón voltios por cada átomo de uranio 235 separado. Aun en el caso de que la eficacia del láser respecto de la conversión de energía eléctrica en luz no sea de más de 0,002, el coste de la energía consumida en el proceso se situaría entre 500 y 5.000 electrón voltios por átomo de uranio 235. Este valor es, por lo menos, 1000 veces menor que el correspondiente al método de difusión gaseosa. Como cabe esperar también que el láser permita alcanzar un alto factor de separación en cada etapa, existe la posibilidad adicional de conseguir la extracción de casi todo el uranio 235 que existe en los minerales naturales. El proceso de difusión gaseosa permite extraer económicamente sólo un 60 o 70 por ciento del uranio 235 que existe en el material base, con lo que en el uranio de los residuos todavía subsiste un contenido de 0,2 o 0,3 por ciento de uranio 235. Una mayor eficacia en la extracción supondría, de hecho, un aumento en las reservas útiles de uranio. Se especula incluso con la posibilidad de que una instalación de separación con láser podría ser capaz de reprocesar los residuos procedentes de las plantas de difusión gaseosa, actualmente almacenados; dichos residuos representan nada menos que entre un 30 a un 40 por ciento de todo el uranio extraído de las minas hasta hoy. Aunque es posible que un análisis económico más ajustado que el precedente condujera a resultados menos optimistas, sí parece lícito creer que, en el caso de que la tecnología con láser se desarrollara adecuadamente, se podría conseguir un ahorro de varios centenares de miles de millones de dólares antes de finalizar el presente siglo.

Todos estos cálculos se basan en la suposición de un uso continuo de reactores de agua ligera, como los que funcionan actualmente en los Estados Unidos. Otro tipo de reactores elimina la necesidad de proceder a la separación de los isótopos del uranio, puesto que el combustible que "queman" es uranio natural. Sin embargo, tales reactores de agua pesada (D_2O) requieren grandes cantidades de deuterio: alrededor de una tonelada de D_2O por cada megavatio de potencia eléctrica instalada. Si se generalizara la adopción de estos reactores de agua pe-

sada, sería necesario usar otro programa de separación de isótopos con láser.

Aunque existen otros campos de utilización de isótopos, además del campo de la generación de energía nuclear, las cantidades que consumen son mucho más pequeñas. Los isótopos son importantes como trazadores en investigación, medicina y agricultura, pero precisamente debido a su gran coste hay pocos incentivos para encontrar nuevas aplicaciones. Esta situación puede cambiar drásticamente si las técnicas de separación de isótopos con láser reducen su coste actual por un factor de 100 a 1000. Por ejemplo, en el campo de la química, un suministro abundante de isótopos a bajo coste podría conducir a intensificar la utilización de compuestos marcados isotópicamente en análisis estructural, detección analítica y estudios de cinética de reacciones.

La separación de isótopos es un proceso muy importante, que puede ser abaratado y, por consiguiente, generalizado mediante el uso del láser. En última instancia, es posible que la aplicación del láser a la química pueda tener una importancia todavía mayor; esta posibilidad surge de forma inmediata cuando el propio láser se contempla a la luz de la historia.

Los orígenes de la química se sitúan generalmente en relación con el trabajo de los alquimistas, alentado por mecenas reales, ansiosos de lograr la conversión de plomo en oro. Desde luego, los alquimistas fracasaron en sus esfuerzos para alcanzar tal transformación, pero gracias a ellos pudieron acumular un conjunto de conocimientos que constituyen la base de buena parte de la química moderna.

En la actualidad, los mecenas reales de las ciencias son los organismos gubernamentales, muy interesados en el desarrollo de nuevos métodos de separación de isótopos, bajo las mismas perspectivas de sustanciosas recompensas económicas. En esta ocasión, probablemente sí se alcanzará la meta que se persigue. No obstante, al igual que antes, el resultado de todas estas investigaciones puede ser mucho más valioso que su objetivo inmediato. Una mejor comprensión del mecanismo de la separación de isótopos con láser puede contribuir a establecer los cimientos de una nueva química, en la que los compuestos se preparen excitando sólo aquellos movimientos internos de las moléculas que faciliten su transformación de reactivos en productos, sin suministrar al azar la correspondiente energía.

Lenguaje social y no social

Para comunicarse eficazmente con los demás, los niños han de aprender no sólo el lenguaje, sino también el uso social del lenguaje, en el cual se toma en consideración el conocimiento y la perspectiva de los interlocutores

Robert M. Krauss y Sam Glucksberg

Tal como lo expresara Bertrand Russell, "por elocuente que pueda ser un perro, no puede decirme que su padre era pobre, pero honrado". Todos los organismos se comunican con los miembros de su propia especie de una u otra manera, y algunos de los sistemas no humanos de señalización pueden ser impresionantemente complejos y eficientes, pero están limitados en un sentido fundamental: cada especie posee un repertorio que suele restringirse cerradamente a un conjunto fijo de mensajes con un conjunto fijo de significados. No pueden construir nuevos mensajes al objeto de comunicar nuevos conceptos, ni siquiera los lugares comunes sobre la pobreza honrada.

A diferencia de lo que ocurre en otras especies, los seres humanos parecen poder comunicarse prácticamente sobre todo, dominen o no las palabras precisas disponibles para hacerlo. Si ocurre que nuestro vocabulario no contiene el término normal para denotar cierto concepto, solemos ser capaces de inventar alguna manera de expresar nuestro significado, quizá mediante el empleo de metáforas o circunloquios. Entre otros, los eruditos, los pedantes y los burócratas idean términos para nuevas invenciones, descubrimientos o conceptos, asignando significados de modo deliberado y explícito. Los niños pequeños también se ven frecuentemente obligados a inventar maneras de hablar acerca de cosas cuyos nombres no figuran aún en su vocabulario. Si bien las expresiones que inventan los niños carecen de las definiciones exactas que caracterizan a la terminología técnica, suelen ser traviesamente precisas y muchísimo más entretenidas, como cuando la hija de un colega nos comunicó su descubrimiento sobre la tonsura de su padre proclamando: "papá tiene un hueco en el pelo".

Todos estamos sometidos a constante presión para inventar nuevas maneras de comunicarnos con otras personas. La necesidad procede en parte de la naturaleza misma del lenguaje. Aunque no es obvio sino hasta que se piensa en ello, la naturaleza del lenguaje no es tal que, para cada palabra, exista una cosa singular (o una clase de cosas) a la que pueda aplicarse. Tampoco exige que a cada cosa nos hayamos de referir mediante una sola y exclusiva palabra. Por ejemplo, la palabra "línea" puede usarse, si el contexto es apropiado, para designar una recta o una curva, una línea telefónica, una línea de aviación, una línea ideológica o una línea tipográfica. De modo análogo, cabe referirse a cualquier cosa en particular mediante un número cualquiera de palabras o frases diferentes. Incluso a una moneda de peseta se le puede llamar eso mismo, o "rubia", o "moneda", o "cambio", o "dinero", etc.

El asunto estriba en que la naturaleza de la relación entre la referencia, o expresión verbal, y el referente, o la cosa a que se hace referencia, no tiene la naturaleza de un código inequívoco. Por ejemplo, en el código Morse, tres puntos seguidos de una pausa momentánea y luego por tres rayas denota invariablemente la secuencia literal *SO*. Ninguna palabra, para no hablar de frases, guarda, en ningún lenguaje natural, tal relación invariable con una cosa o concepto al que pueda denotar.

Al aprender la lengua, aprendemos dos especies diferentes de cosas. Aprendemos la lengua en sí, es decir, su sistema de sonidos, su sintaxis y su vocabulario. Debemos aprender también a manipular el lenguaje para comunicar conceptos eficaz y eficientemente, y esto no es precisamente lo mismo que haber aprendido el lenguaje. Una manera de apreciar este distingo es contrastar los mensajes sociales con otros que no lo sean. Los mensajes no sociales son aquellos no destinados a comunicar información a otra persona; pueden expresarse en el lenguaje abreviado, idiosincrásico y privado que uno usa para escribir para sí un memorándum. Como el lenguaje no social no está dirigido a otra persona, no se precisa, para su formulación, tomar en cuenta el conocimiento y la perspectiva del receptor. Quienes hablan un lenguaje no social hacen como si se dirigiesen a los niños de modo exactamente igual al que emplean con adultos, o, a los legos, de la misma manera como hablan con sus colegas. A un ornitólogo que recurra al lenguaje social, si quiere llamarle la atención a un niño sobre un "petirrojo" enjaulado no se le ocurrirá preguntarle: "¿ves ese *Turdus migratorius?"*. Los mensajes sociales se caracterizan por su variabilidad, al te-



AL DAR DIRECCIONES en una calle muy concurrida, los transeúntes se comunican social-

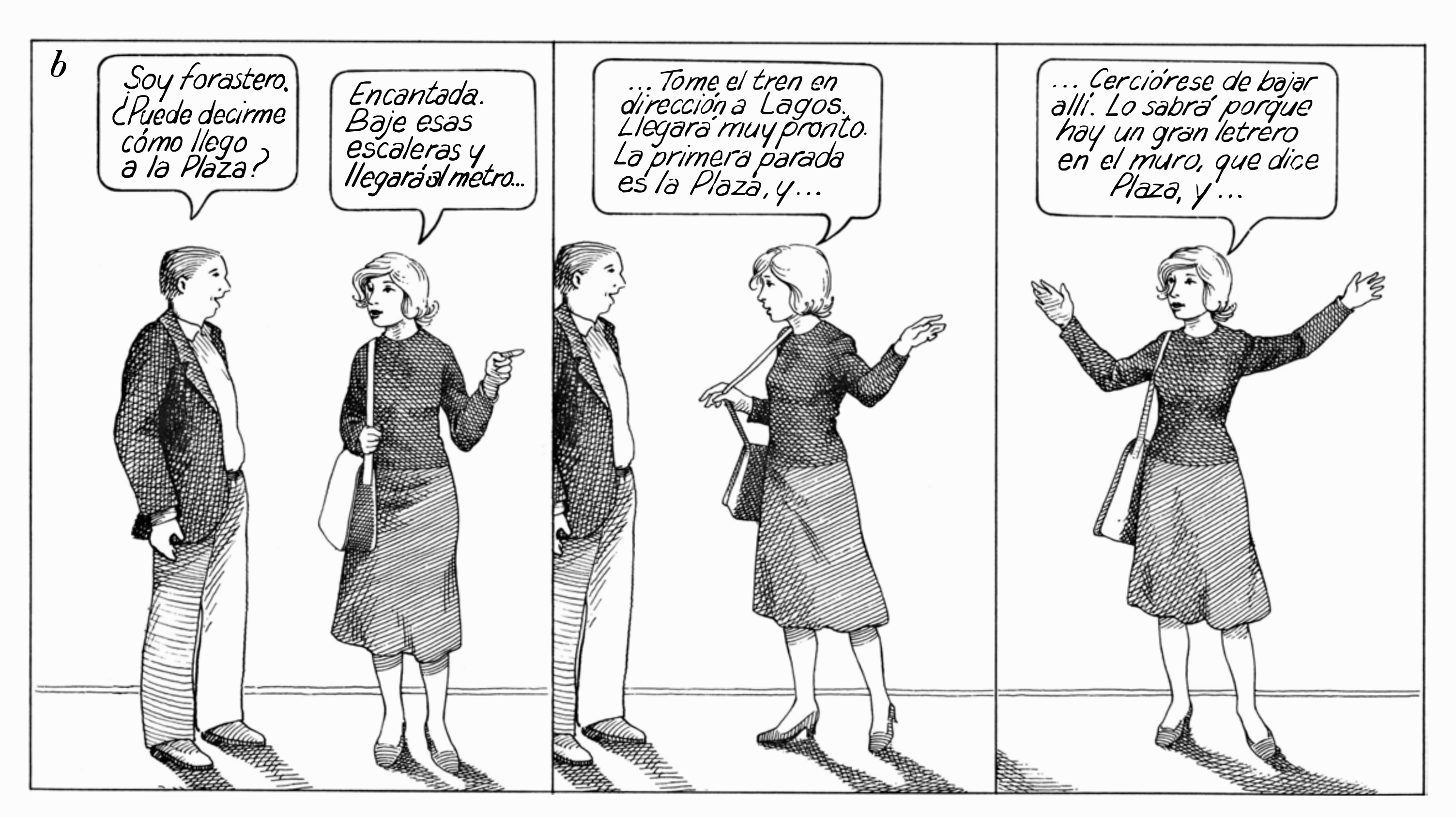
ner en cuenta la naturaleza del auditorio y el contexto de la conversación.

No es difícil mostrar que la gente toma en consideración las características de su auditorio. Douglas Kingsbury, que cuando aconteció lo siguiente acababa de licenciarse por la Universidad de Harvard, se dirigió a ciertos transeúntes, seleccionados al azar, de las calles de Cambridge y les preguntó el camino para llegar a la Plaza Central. A unos les formuló así la pregunta: "¿Puede decirme cómo se llega a la Plaza Central?", con un deje local inespecífico. La respuesta típica fue breve y directa, con una cantidad de información ni menor ni mayor de lo que la situación parecía exigir. ¿Refleja esto la brusquedad e impersonalidad de la moderna vida urbana? En absoluto. Cuando Kingsbury prologó su pregunta con la declaración "soy forastero", los mismos y atareados ciudadanos de Cambridge le dieron complicadas y minuciosas indicaciones, describiéndole los hitos que hallaría en su camino y diciéndole cómo podía estar cierto de haber llegado a la Plaza Central al estar allí. Curiosamente, Kingsbury descubrió que podía conseguir el mismo efecto si señalaba implícitamente su ignorancia de la geografía local al adoptar el acento rural de Missouri, el cual resulta bastante exótico en Cambridge como para dejar bien sentada su condición de "forastero".

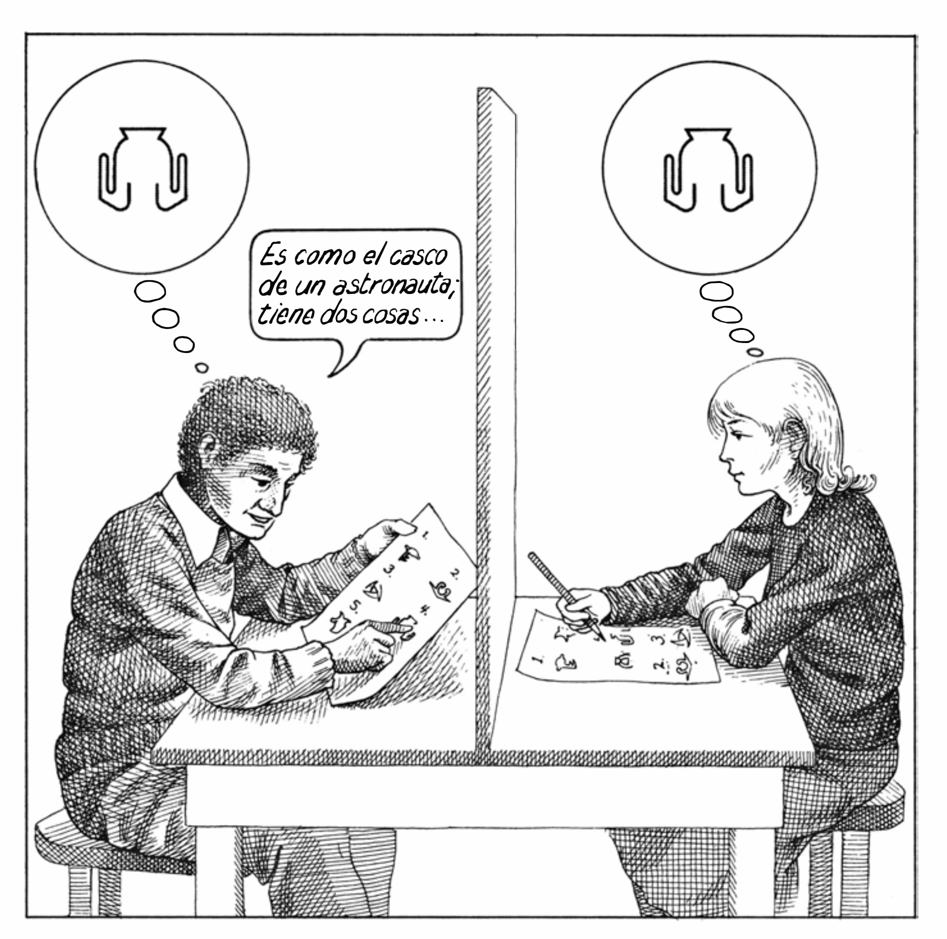
Lo que estaban demostrando esos transeúntes era su conocimiento implícito acerca de cómo usar comunicativamente el lenguaje. No decían lo mismo aunque estuviesen hablando de lo mismo, a saber: cómo llegar del punto x al punto y. Adaptaban lo que decían y la manera de decirlo a lo que, según entendían, era el conocimiento y alcance del oyente. Así ocurre con los adultos, que acomodan lo que dicen según estén hablando con niños o con otros adultos. Noam Chomsky, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros han sostenido que las habilidades lingüísticas deben adquirirse mediante algún "dispositivo innato para la adquisición lingüística", porque, entre otros motivos, los niños no podrían aprender un lenguaje con sólo ser expuestos a la clase de habla que los adultos emplean comúnmente entre sí, que es sintácticamente compleja, fragmentada y prácticamente incomprensible fuera de su contexto. Catherine E. Snow, de la McGill University, meditando sobre el punto de vista de Chomsky, decidió comparar las formas en que las mujeres adultas hablan a niños mayores o menores. Cuando se dirigían a los más pequeños, las mujeres que ella estudió, fueran o no madres experimentadas, lo hacían con frases breves y de sintaxis simple. En consecuencia, lo probable es que un niño de dos años escuchara, entendiera y aprendiese habilidades lingüísticas del siguiente tipo de lenguaje: "ése es un león. El león se llama Leo. Leo vive en una casa grande. Leo sale a dar un paseo todas las mañanas. Y siempre lleva su bastón consigo". Las mujeres sabían muy bien que sería inútil expresar las mismas ideas, a ese crío de dos años, de esta otra manera: "ése es un león llamado Leo que vive en una casa holgada y ha tomado la costumbre de darse un garbeo cada mañana, invariablemente acompañado de su bastón".

¿Cómo y cuándo aprenden los niños a emplear el lenguaje de manera que se acomode a las exigencias de un determinado oyente y a las circunstancias especiales de una conversación? Abordamos esta cuestión partiendo de un ejercicio de comunicación que uno de nosotros (Krauss) había ideado hacía unos años. El objetivo de la investigación original había sido valorar la eficiencia de la comunicación entre adultos a través de un canal de comunicación ruidoso o alterado. Junto con los resultados sobre ese interrogante, la investigación reveló ciertas pautas a las cuales parece adaptarse la comunicación entre adultos; dichas pautas se convirtieron en nuestro modelo prototipo para valorar las habilidades comunicativas de los niños.

El ejercicio de comunicación implicaba a un locutor y a un oyente separados por una barrera opaca. En la versión adulta, el locutor tenía frente a sí una



mente. Cuando alguien que parece de la misma ciudad pregunta por una dirección, la gente le contesta breve y directamente *(a)*. Pero cuando quien pregunta se identifica como forastero, o parece serlo, le responden con extrema minuciosidad y le abruman con detalles y pormenores *(b)*.



EL EJERCICIO DE COMUNICACION PARA ADULTOS exigía a un locutor *(izquierda)* describir seis dibujos extraños recogidos en una hoja de papel y asignar un número a cada dibujo; un oyente *(derecha)* había de asignar el número correcto a unas copias de los mismos dibujos.

FORMA	DESCRIPCION INICIAL	VERSION MAS BREVE	VERSION FINAL
1	Parece el motor de una lancha. Lleva una cosa colgando con dos dientes	Motora con dientes	Motora
2	Parece dos gusanos o serpientes mirándose de frente. La parte inferior parece el balancín de una mecedora	Dos gusanos mirándose de frente	Dos gusanos
3	Es un zigzag con líneas ordenadas en todas las direcciones	El zigzag con líneas	Zigzag
4	Es como el casco de un astronauta. Tiene dos cosas que se levantan por los lados	El casco de astronauta	Casco
5	Parece una cabeza de caballo	Cabeza de caballo	Caballo
6	Es una taza al revés. Tiene dos triángulos, uno sobre el otro	Una taza al revés	La taza

LOS LOCUTORES ADULTOS se comunicaban satisfactoriamente dando descripciones detalladas la primera vez que se topaban con un dibujo, teniendo en cuenta la dificultad del oyente para identificar las formas no conocidas. Cuando las mismas formas aparecían en ensayos ulteriores, los locutores abreviaban sus descripciones, y seguían siendo bien entendidos por sus oyentes.

página en donde aparecía un conjunto de dibujos numerados ordenadamente, del uno al seis. El oyente tenía frente a sí los mismos dibujos dispuestos de otro modo en la página, y sin numerar. El ejercicio exigía que el locutor describiese cada dibujo y diese su número, de modo que el oyente pudiese identificar su propia copia y numerarla correlativamente. La medida de la precisión de la comunicación era el grado en que quedase correctamente numerado el conjunto del oyente; la eficacia de la comunicación se medía por el número de palabras que locutor y oyente requerían para ejecutar el ejercicio.

El ejercicio dejó de ser trivial al construirse deliberadamente los dibujos de modo que no tuviesen "nombres" breves o conocidos. Las seis formas eran fáciles de distinguir entre sí, pero no evocaban descripciones sencillas o inequívocas. Los adultos encontraron, sin embargo, que la tarea resultaba trivialmente fácil, ya se tratase de universitarios incipientes, prácticos en los usos de los experimentos psicológicos, o reclutas del Ejército sin mayor instrucción. Incluso sin comunicación retrospectiva al locutor o conocimiento de los resultados proporcionado por el experimentador, algunas parejas de adultos apenas si cometieron errores en el primer intento.

Los adultos se caracterizaron por el desarrollo de un eficiente código social (para oponerlo a un código lingüístico), al igual que los músicos "pop" o los biólogos moleculares elaboran su propia jerga especializada. Al inicio de la interacción comunicativa, el lenguaje del locutor era detallista, redundante y hasta prolijo. Por ejemplo, la primera vez que un locutor adulto hablaba a propósito de cierta forma, la describía en nueve palabras; cuando, en una prueba posterior, aparecía el mismo modelo necesitaba menos palabras y, al llegar a la cuarta prueba, ya había optado por una palabra para comunicar su mensaje. La frase descriptiva original era siempre una referencia eficaz: al escucharla, otras personas podían seleccionar con precisión el referente a que aludía. En cambio, el breve mensaje final sólo resultaba adecuado para quienes hubieran escuchado antes el mensaje original redundante; generalmente no comunicaba gran cosa a quien no hubiese participado en la interacción social desde el principio.

Teniendo presente estas dos características de la comunicación del par adulto, la precisión y el desarrollo del lenguaje social, nos pusimos a ver qué harían unos niños pequeños en un ejercicio

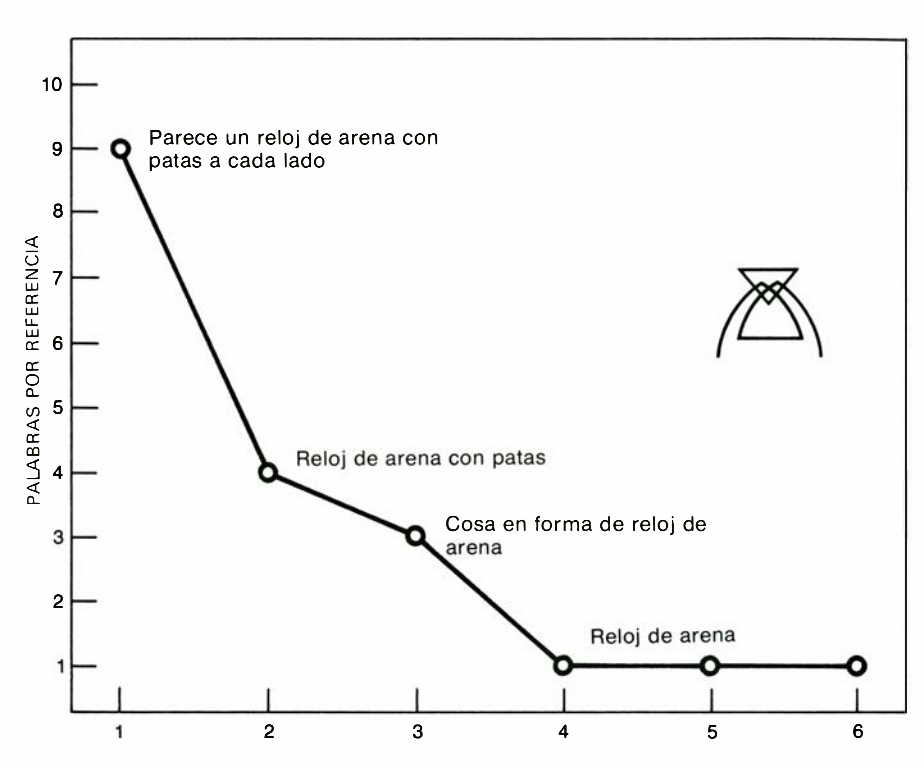
comparable, a modo de juego, que consistía en ordenar bloques. El locutor tenía ante sí una clavija y una caja, cuya tapa frontal era transparente y contenía seis bloques; cada bloque tenía un orificio que lo atravesaba y estaba rotulado con un dibujo que lo identificaba. El oyente disponía de otra clavija y poseía duplicados de los seis bloques colocados al azar sobre su mesa. El locutor debía tomar cada vez un bloque de su caja, encajarlo en la clavija y decirle a su compañero qué bloque había de encajar en la clavija. Se continuaba así hasta que quedaran encajados los seis bloques tanto en la clavija del locutor como en la del oyente.

Se comenzó con niños del jardín de infancia. Primero nos cercioramos de que podían jugar cuando cada bloque representaba un animal conocido o un objeto doméstico en vez de los dibujos extraños y difíciles de describir que se habían presentado a los adultos. Luego los reemplazamos por bloques en los que se habían puesto los dibujos extraños. Un experimentador actuaba como locutor y describía los dibujos tal como los había descrito un adulto en el experimento original. Cuando a un grupo de niños de 52 a 63 meses de edad se les leyó un grupo típico de descripciones iniciales *(véase la ilustración inferior de la página opuesta),* ninguno cometió un error. Continuaron desenvolviéndose con precisión, aun cuando en pruebas subsiguientes se fueron simplificando los mensajes, tal como había ocurrido en las interacciones de adultos de las cuales se extractaron.

Ahora bien, cuando los niños realizaron el juego entre sí, ninguna de las seis parejas que sometimos a prueba pudo completar un solo intento sin error, a pesar de habérseles señalado tras cada prueba los errores cometidos. Al contrario de los adultos, estos jóvenes locutores usaron breves mensajes idiosincrásicos al comienzo; raramente, si acaso lo hicieron, empezaron con un mensaje elaborado y redundante. Hubo una notable carencia de homogeneidad de descripciones entre los diversos locutores como también una falta de relación obvia entre referencia y referente. A partir de tales descripciones, parcas e idiosincrásicas, no resultaba sorprendente que los jóvenes oyentes no pudiesen elegir los bloques correctos. Nos preguntábamos si los locutores sabían o no de qué estaban hablando. ¿Asignaron esos nombres ciega y aleatoriamente, o lo hicieron según modos significativos en algún sentido, aunque sólo lo fuesen para ellos mismos?

Un indicio de la no aleatoriedad de los nombres fue la misma no contradicción de la nomenclatura. Una vez que un niño había asignado un nombre a un referente, ya no lo solía cambiar a lo largo del juego. Pero, ¿entendería el muchacho su propia nomenclatura si la viera en el papel de su interlocutor? Examinamos eso invirtiendo los papeles: se puso el antiguo locutor, de oyente, y, un experimentador, de locutor. Este daba instrucciones al niño, designando a cada forma con el mismo nombre que ese niño había indicado anteriormente. Para sorpresa nuestra, ninguno de los niños que sometimos a prueba cometió error alguno, ya sea durante la primera sesión en que había generado el nombre o después de un período de tres semanas durante el cual no había prácticas o estudios intermedios. Evidentemente, las descripciones propias de un locutor eran significativas para él, pero no para nadie más, porque estos muchachos no habían aprendido todavía a usar un lenguaje suyo que les permitiera elaborar un código socialmente compartido y mutuamente comprensible.

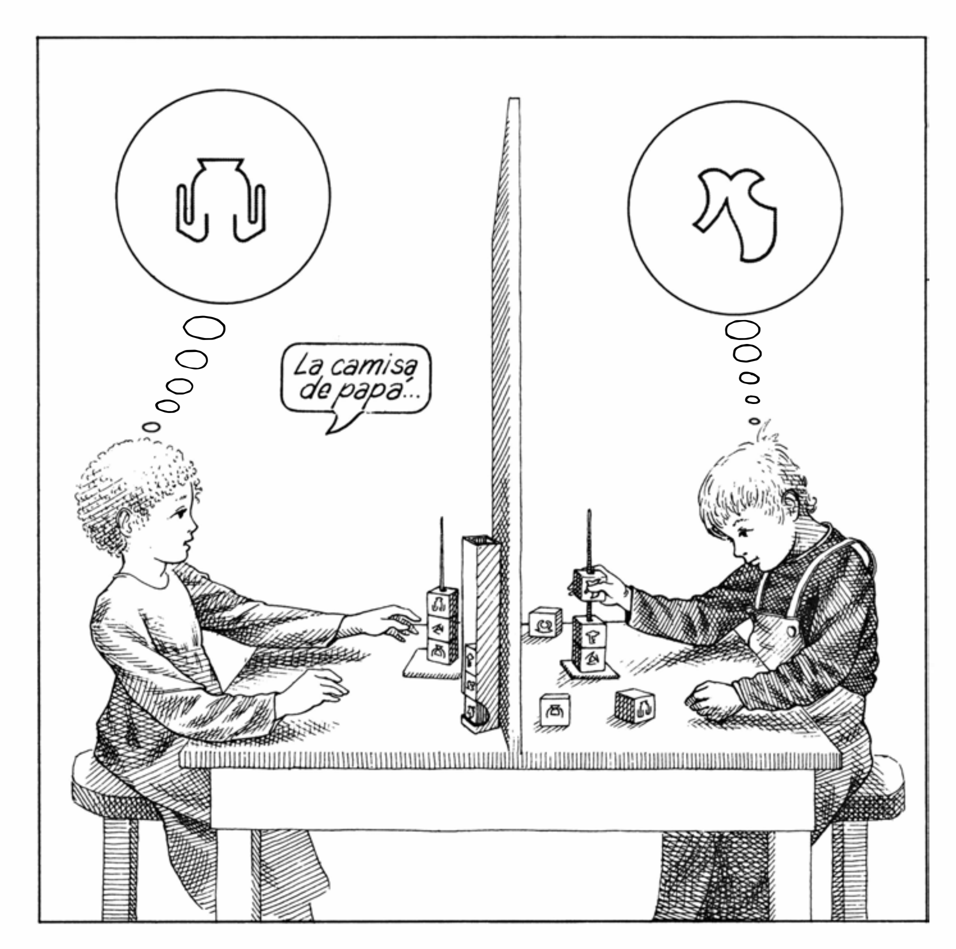
¿Cuánto tiempo tardan los niños en alcanzar los niveles de capacitación de los adultos en este ejercicio? En nuestro primer intento por seguir el desarrollo hasta que consiguen la propiedad del adulto, Hugh O'Brien, que acababa de licenciarse entonces por la Universidad de Princeton, sometió a prueba a parejas de niños de igual edad, desde el parvulario hasta el quinto curso, con el mismo problema que habíamos planteado a los párvulos. Cada pareja de niños realizó el juego durante ocho sesiones sucesivas, de dos pruebas cada una.



EL PROCESO DE ABREVIACION es el desarrollo tácito de un código social entre dos personas; aquí se ilustra con la descripción de una forma por parte de un locutor.

Los resultados fueron un tanto sorprendentes. Los niños de parvulario no se desenvolvieron mejor que los del jardín de infancia, y exhibieron la misma ausencia de perfeccionamiento en la práctica. Si se piensa que los adultos apenas cometieron errores en el primer intento, el desenvolvimiento de los niños de primer, tercer y quinto cursos resulta todavía más sorprendente: en el primer intento, no se mostraron más hábiles que sus pequeños compañeros. Los niños mayores mostraron un notorio mejoramiento con la práctica, pero parecía evidente que ni siquiera los de quinto curso (cuya edad era de unos 10 años) se aproximaban al nivel adulto. Esto sorprende más por cuanto se proporcionó a los niños una información completa acerca de sus resultados en cada intento, mientras que a los adultos no se les dio ninguna. ¿Qué grado de éxito tendrían los niños mayores en el caso de no recibir información retrospectiva?

Sometimos a prueba a niños de los cursos tercero al noveno inclusive, adscritos al sistema escolar de Princeton, usando aquella versión del ejercicio en que se utilizan bloques, pero sin detallarles información alguna sobre los resultados que lograban. Nuevamente



LA VERSION PARA NIÑOS exigía al locutor que describiese los dibujos colocados en bloques que aparecían en la base de una caja y que luego apilase los bloques sobre una clavija. El oyente debía seleccionar los bloques correctos de un conjunto ordenado al azar y apilarlos en el mismo orden. Los locutores más pequeños dieron descripciones incomprensibles.

FORMA	NIÑO 1	NIÑO 2	NIÑO 3	NIÑO 4	NIÑO 5
1	Piernas de hombre	Avión	Colgador de ropa	Cebra	Platillo volante
2	Sombrero de mamá	Anillo	Llavero	León	Serpiente
3	Alguien corriendo	Aguila	Boomerang	Cintas	Alambre
4	Camisa de papá	Jarro de leche	Colgador de zapatos	Cafetera	Perro
5	Otra camisa de papá	Pájaro	Colgador de trajes	Traje	Cuchillo
6	Vestido de mamá	Ideal	Excavación	Oruga	Fantasma

DESCRIPCIONES INICIALES TIPICAS ofrecidas por cinco locutores de jardín de infancia para cada forma. Al revés de las descripciones de los adultos, eran breves e idiosincrásicas.

nos sorprendió su actuación deficiente. Se sometió a prueba a diez pares de niños de cada curso. La proporción de parejas que acertaron perfectamente en los tres primeros intentos fluctuó entre el 25 y el 42 por ciento *(véase la ilustración inferior de la página opuesta)*. Los de tercer curso no mejoraron en absoluto a lo largo de 15 intentos, y los de quinto y séptimo curso mejoraron muy poco. Los de noveno, si bien mostraron notables progresos en ensayos posteriores, no lograban la precisión perfecta mostrada por los adultos.

¿Qué factores pueden justificar el desenvolvimiento notablemente inepto de los jugadores más jóvenes, y el logro sorprendentemente lento de la capacitación, a nivel de adulto, entre los niños pertenecientes a los cursos superiores?

Cuando empezamos trabajando con niños muy pequeños, llegamos algo ingenuamente a la conclusión de que el factor primario que explicaba los fracasos comunicativos en nuestra situación experimental era el "egocentrismo infantil", expresión acuñada por el psicólogo evolutivista suizo Jean Piaget para describir el razonamiento y el habla típicos de una etapa temprana del desarrollo cognoscitivo. En su expresión más simple, el comportamiento egocéntrico se caracteriza por la incapacidad para alejarse uno mismo del propio punto de vista y para tomar en cuenta la perspectiva de su interlocutor. Ocurre como si el niño egocéntrico pensase que los demás conocen con precisión aquello que él conoce y creen lo que él cree; en resumen, que los demás son el otro yo. El egocentrismo pasa por una gradación lógica; a la edad de dos años, la mayoría de los niños son conscientes de que los adultos están más enterados, son más hábiles e, indiscutiblemente, más poderosos. Pero pensábamos que quizá los niños pequeños no apreciarían el hecho de que alguien pudiera no estar más enterado, que pudiera desconocer algo que ellos mismos conocen y que lo que les resulta evidente y perceptible quizá no sea tan obvio para algún otro.

En este sentido, los mensajes producidos por nuestros jugadores de menor edad podrían describirse acertadamente como egocéntricos. Son significativos para el locutor que los produce, pero no pueden ser entendidos por nadie que no comparta la singular perspectiva del locutor. Recogimos un ejemplo especialmente sorprendente de este tipo de interacción en una pareja de niños de cuatro años:

– Locutor (refiriéndose a una de las figuras geométricas): "Es un pájaro".

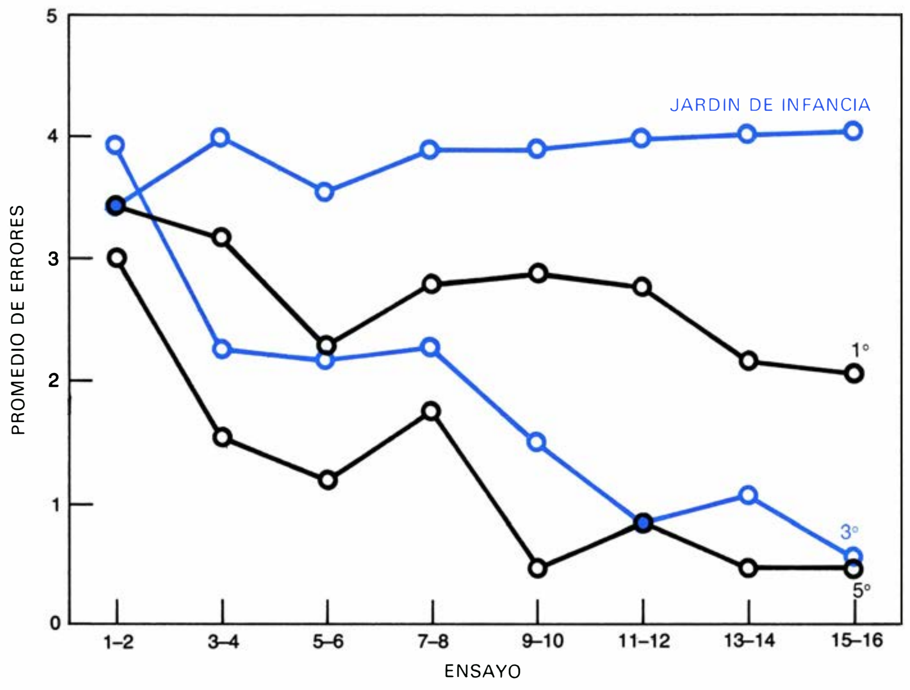
– Oyente: "¿Es éste?".
– Locutor: "No".
No podían verse entre sí ni los materiales que los estimulaban, pero su interacción no da prueba de ello.

Por tentadora que pueda ser dicha explicación de la actuación deficiente de los niños pequeños, resulta insatisfactoria por una serie de motivos. Primero, numerosos intentos de hallar correlaciones entre medidas patrones del egocentrismo y la realización de ejercicios de comunicación han fracasado en lo referente a la producción de resultados convincentes. Segundo, hacia los ocho años, la mayoría de los niños deberían haber sobrepasado la edad en que el egocentrismo es un factor importante en su conducta, y, sin embargo, hubo niños de 13 y 14 años que no se desenvolvieron a lo largo del ejercicio con la competencia manifestada por un adulto. Si bien el egocentrismo puede contribuir a la actuación deficiente de los niños menores, no puede explicar el patrón global de desenvolvimiento que hemos observado. El egocentrismo es una noción descriptiva: caracteriza ciertos tipos de comportamiento, pero no dice por qué se manifiestan así.

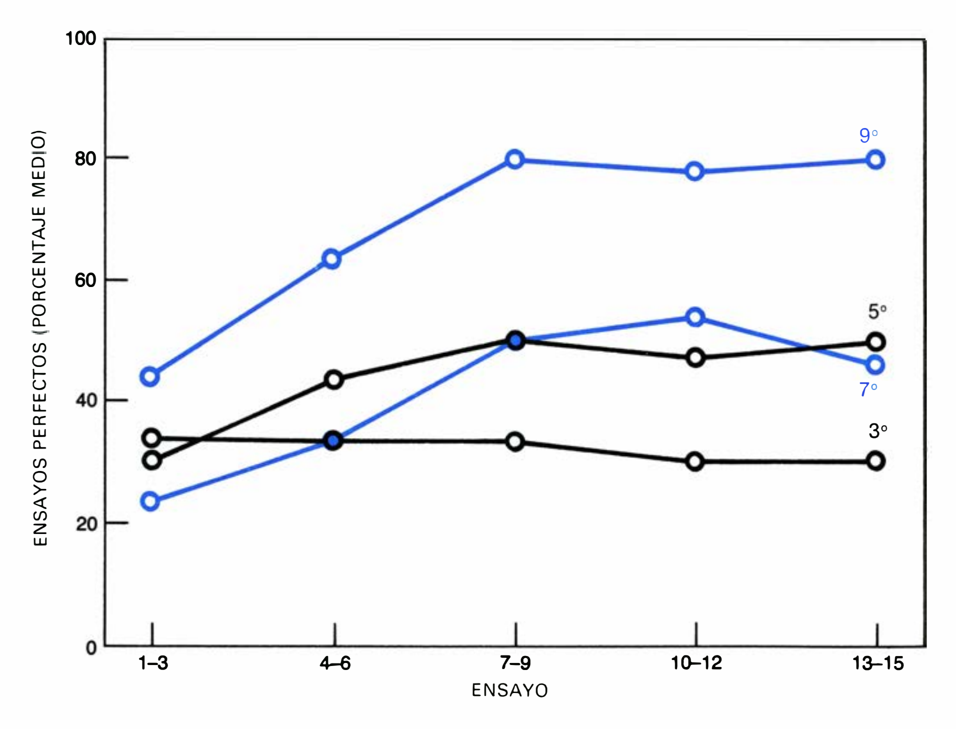
¿Cómo han de explicarse entonces las diferencias en el comportamiento comunicativo existentes entre niños de diferente edad y entre niños y adultos? ¿Carecen realmente los niños de la capacidad de desempeñar papeles (asumir momentáneamente la perspectiva de otra persona), que parece ser necesaria para una actuación eficaz en todas las situaciones comunicativas, excluidas las más rutinarias y estereotipadas? ¿O acaso ocurre que los niños, incluso los de cuatro años, poseen la capacidad de representar papeles, pero por uno u otro motivo no despliegan esta habilidad en ciertos contextos experimentales? Quizá estos niños deban aprender aún en qué circunstancias la representación de roles es particularmente importante para la comunicación eficaz. O quizá dejen de hacerlo cuando la tarea o ejercicio es demasiado exigente en lo cognoscitivo, es decir, cuando les sobrecarga la capacidad de procesamiento de información.

Estudios recientes efectuados en nuestros propios laboratorios y en los de otros investigadores parecen orientarse poderosamente en la dirección de tal posibilidad. Conforme simplificamos el ejercicio cognoscitivo y disminuimos de ese modo la carga cognoscitiva bruta que el niño ha de padecer, el desenvolvimiento de los niños, aun los muy pequeños comienza a aproximarse al nivel de capacitación del adulto. Esto sugiere que la actuación deficiente de los niños en determinadas situaciones de comunicación quizá provenga de algo que no sea una incapacidad general de tomar en consideración la perspectiva de otra persona. Si las dificultades del ejercicio son leves, los niños entablan un lenguaje social y no egocéntrico, y se comunican bastante satisfactoriamente. Conforme las exigencias se hacen más rigurosas, el niño puede intentar recurrir a estrategias de comunicación social, pero lo hace con menor eficacia que el adulto. Por último, cuando las exigencias del ejercicio se hacen estrictas, los niños pueden carecer de la oportunidad de poner en juego las habilidades de comunicación social que poseen.

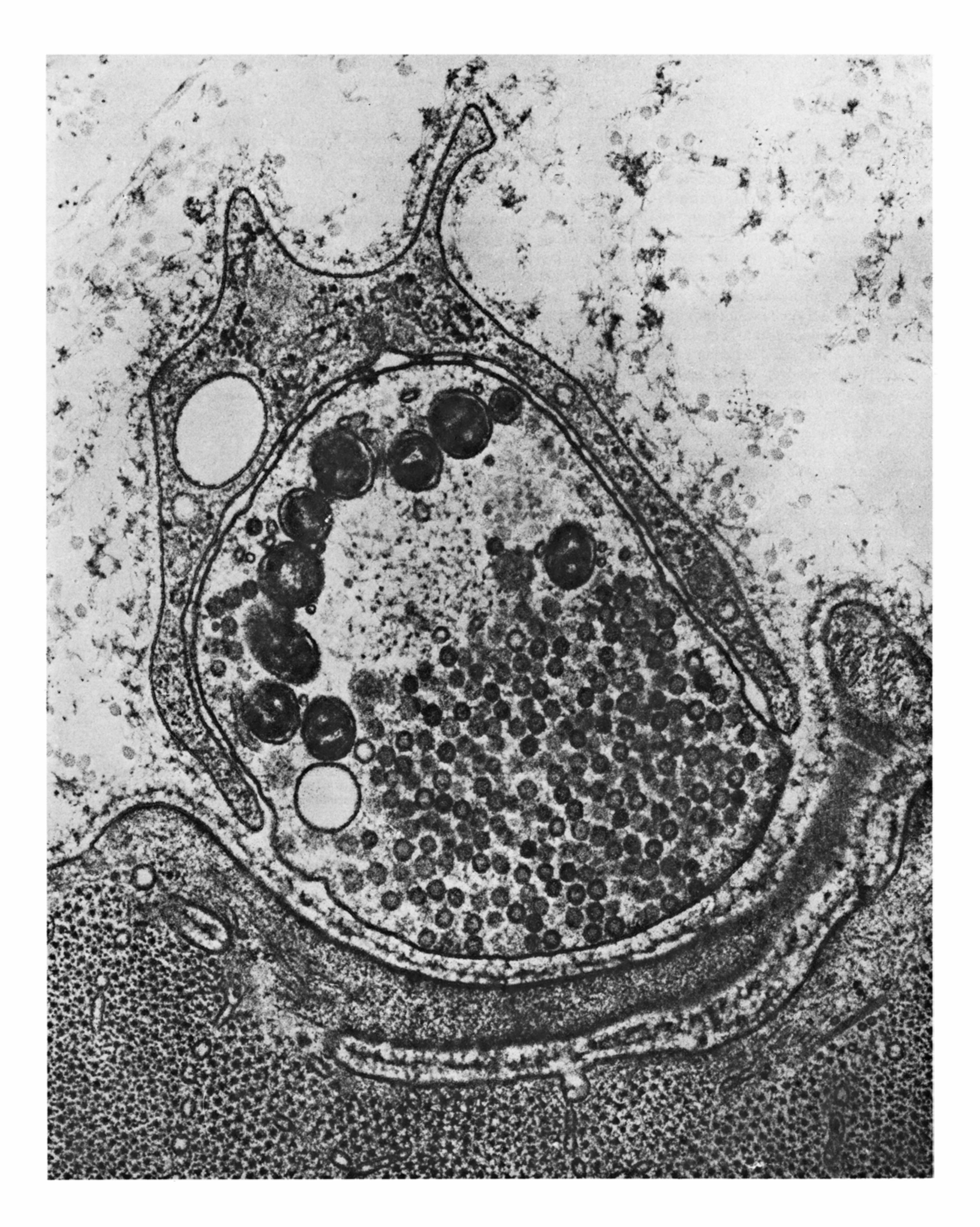
Si esto pareciera extraño, conviene tener presente que los mismos adultos con soltura y dominio verbal pueden toparse con situaciones en las que no llegan a tomar en cuenta el conocimiento y la perspectiva de sus interlocutores.



LOS NIÑOS DE ESCUELA ELEMENTAL se desenvolvieron deficientemente en sus intentos iniciales. Los de parvulario no mejoraron con la práctica. Los de primer, tercer y quinto curso mejoraron, con la ayuda del experimentador que señalaba los errores que habían estado cometiendo.



LOS NIÑOS MAYORES, sometidos a la prueba de los bloques, pero sin información de vuelta proporcionada por los experimentadores, no igualaron el comportamiento de los adultos.



ZONA EN QUE LA ACETILCOLINA se libera del terminal de una neurona aumentada unas 71.400 veces. El terminal está repleto de vesículas sinápticas que contienen moléculas de acetilcolina; las formaciones mayores de color oscuro son mitocondrias, que generan la energía necesaria para las actividades de la terminación nerviosa. La llegada de un impulso nervioso a esta zona provoca la fusión de las vesículas sinápticas con la membrana, liberándose acetilcolina en la hendidura llena de líquido que se encuentra entre el terminal y la célula muscular. Luego, las moléculas de acetilcolina se unen a unos receptores que están empotrados en la membrana de la célula muscular. En la parte inferior de la hendidura se muestra una sección parcial de una profunda invaginación, también llamada pliegue de unión, que presenta la membrana de la célula muscular.

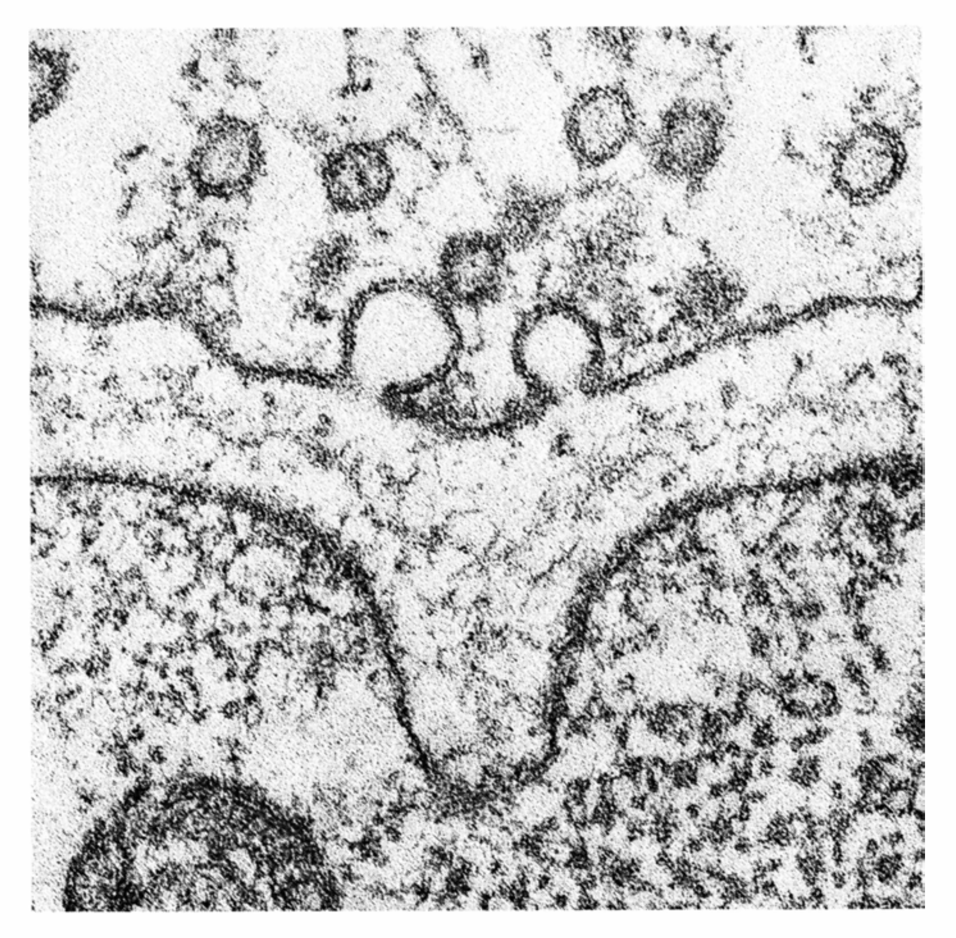
La respuesta a la acetilcolina

Cuando un nervio provoca la contracción de una célula muscular, le lanza un pequeño chorro de acetilcolina. Los receptores de la célula responden abriéndose para permitir el paso de iones a través de la membrana celular

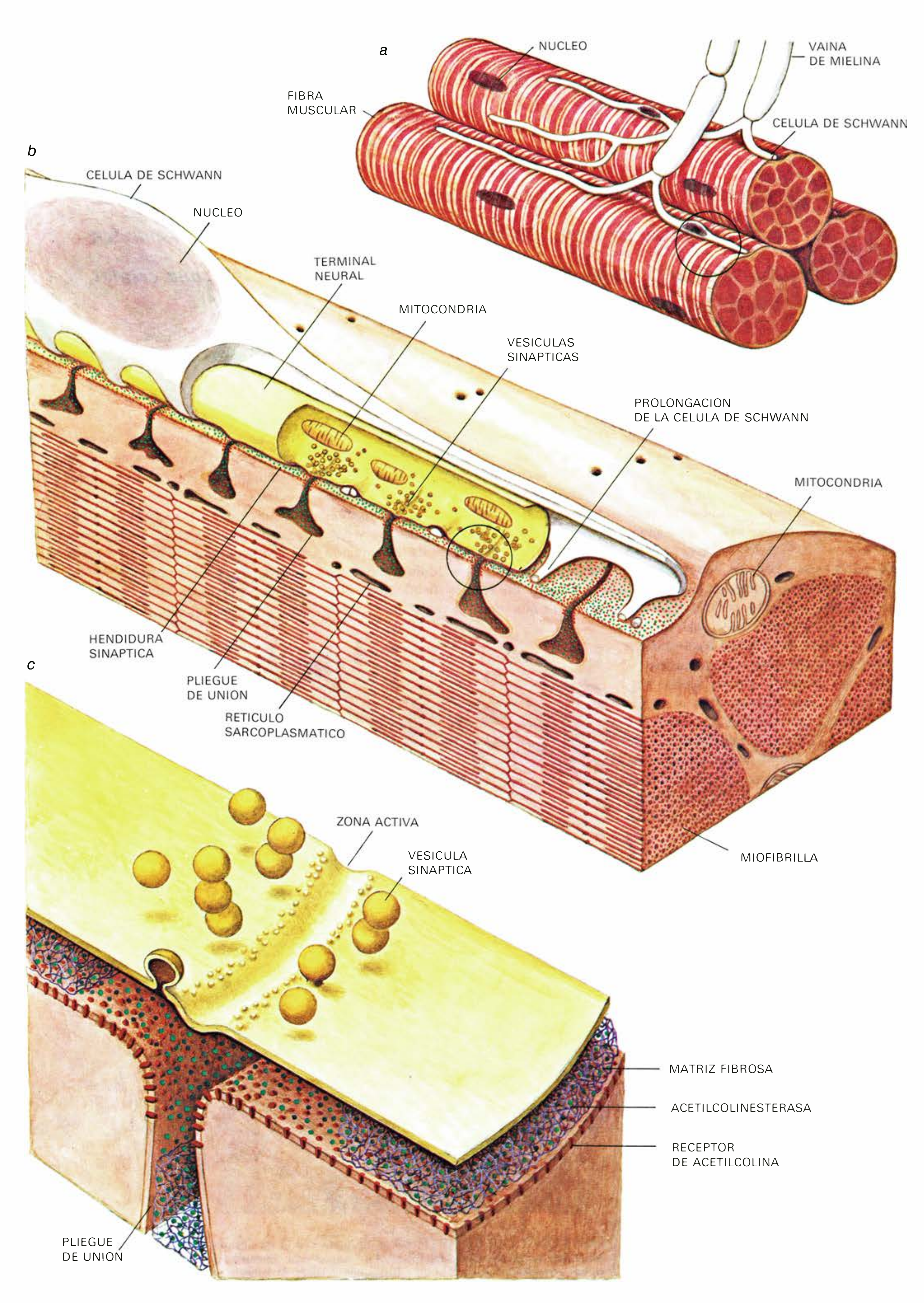
Henry A. Lester

La transmisión de impulsos de una célula viva a otra es tan rápida que, durante mucho tiempo, se pensó que se trataba de un fenómeno puramente eléctrico. La investigación a través de la microscopía óptica ayudó a acentuar esta impresión, al revelar que las células que poseen este tipo de conexiones se hallan en contacto íntimo, en las llamadas sinapsis. Más adelante, en 1921, mediante un elegante experimento realizado en la Universidad de Graz, en Austria, Otto Loewi demostró que la transmisión sináptica se producía gracias a unas sustancias químicas transmisoras, al menos en el sistema que él había estudiado. Según Loewi, la idea del experimento se le ocurrió en un sueño. Entonces se sabía que se podía conservar el corazón de una rana, aislado, en una vasija de líquido salino sin que dejara de latir y que, por otra parte, la estimulación del nervio vago que inervaba al corazón reducía la frecuencia cardíaca. Loewi colocó en vasijas diferentes dos corazones de rana que seguían latiendo e hizo que el líquido perteneciente a la vasija que contenía uno de los corazones pudiera fluir a través del otro corazón. Al estimular el nervio vago del primer corazón, quedaba reducida la frecuencia de éste y, tras un breve intervalo de tiempo, la frecuencia del segundo corazón también disminuía. Estaba claro que el nervio vago estimulado había liberado alguna sustancia, la cual, transportada por el líquido, había dejado su huella en el segundo corazón. Loewi denominó a la sustancia transmisora desconocida *sustancia vagal;* un análisis posterior llevado a cabo en su laboratorio puso de manifiesto que se trataba de la acetilcolina, una molécula relativamente pequeña.

Desde entonces se ha identificado a la acetilcolina como la sustancia transmisora en diversas sinapsis, tanto en animales vertebrados como en invertebrados. En el cuerpo humano, la acetilcolina retarda el corazón, contrae los músculos involuntarios, controla la contracción de los músculos voluntarios y participa en las funciones de integración del cerebro y de la médula espinal. La diversidad de efectos fisiológicos atribuibles a esta pequeña molécula se puede explicar por la presencia de receptores específicos en la membrana de las células postsinápticas. Se conocen varios tipos de receptores de acetilcolina. La forma de funcionar de casi todos ellos, según parece, consiste en traducir la unión con la acetilcolina en la acción de abrir unos poros en la membrana celular, que dejan pasar iones tales como el ion sodio y el ion potasio. Según cuales sean



LAS VESICULAS SINAPTICAS se fusionan con la membrana de la neurona, descargando su contenido en la hendidura sináptica. La imagen está aumentada 230.000 diámetros, y se obtuvo por congelación del tejido un milisegundo después de haberlo sometido a un estimulo eléctrico.


a
NUCLEO
VAINA
DE MIELINA
FIBRA
MUSCULAR
CELULA DE SCHWANN
b
CELULA DE SCHWANN
NUCLEO
TERMINAL
NEURAL
MITOCONDRIA
VESICULAS
SINAPTICAS
PROLONGACION
DE LA CELULA DE SCHWANN
MITOCONDRIA
HENDIDURA
SINAPTICA
PLIEGUE
DE UNION
RETICULO
SARCOPLASMATICO
MIOFIBRILLA
c
ZONA ACTIVA
VESICULA
SINAPTICA
MATRIZ FIBROSA
ACETILCOLINESTERASA
RECEPTOR
DE ACETILCOLINA
PLIEGUE
DE UNION

los iones que atraviesan el poro, la carga eléctrica que lleven y la dirección en que se muevan, el efecto producido por la acetilcolina representará su excitación o su inhibición. En los últimos años, se ha conseguido más información acerca de la respuesta a la acetilcolina en la sinapsis entre nervios y músculos voluntarios y en las sinapsis, muy semejantes a las anteriores, entre los nervios y los órganos eléctricos de algunos peces, como la anguila eléctrica. Estos estudios ahondan nuestro conocimiento de la sinapsis química, que consideramos como una máquina biofísica diminuta, aunque sumamente compleja, preparada para operar a una escala de tiempo de unos milisegundos y a una escala de distancia de unos micrómetros.

En la sinapsis neuromuscular, la fibra del nervio motor carece de su vaina grasa de mielina y se ramifica en finos terminales. Cada terminal se encuentra en una depresión poco profunda, en forma de surco, sobre la superficie de la célula muscular. El microscopio electrónico pone de manifiesto lo que con el microscopio óptico resultaba invisible: en la sinapsis neuromuscular, las membranas respectivas de la terminación nerviosa y de la célula muscular están separadas, unos 500 angstroms, por una hendidura llena de un líquido. A lo largo del terminal neural, y a una distancia de un micrómetro (10.000 angstroms) entre ellas, se hallan unas zonas especializadas, asociadas con grupos de minúsculas vesículas, o sacos, cada uno de los cuales contiene unas 10.000 moléculas de acetilcolina. En la membrana muscular hay unas invaginaciones profundas, llamadas pliegues de unión, situadas precisamente enfrente de los grupos de vesículas, con respecto a la hendidura sináptica. Los receptores de acetilcolina se hallan sobre las crestas de estos pliegues y también en parte de su región descendiente: estos receptores son moléculas de proteína, empotradas en la membrana. Las moléculas del receptor están reunidas de forma densa en estas regiones; suponiendo que estuvieran distribuidas uniformemente sobre la parte aplanada de la membrana, distarían entre sí sólo de 50 a 100 angstroms. Sin embargo, su densidad disminuye en un factor de 100, como mínimo, al alejarse tan sólo unos pocos micrómetros de la cresta del pliegue en cuestión.

Cuando llega un impulso al nervio terminal presináptico, provoca un flujo de iones calcio a través de su membrana, dirigido hacia el interior. Esto induce la fusión de varios centenares de vesículas sinápticas con la membrana presináptica, en unas regiones especializadas llamadas zonas activas, liberándose así en la hendidura sináptica el contenido de las vesículas: moléculas de acetilcolina. La sustancia transmisora se difunde rápidamente en la hendidura y alcanza a la membrana de la célula muscular, donde se combina allí con las moléculas de receptor.

En un intervalo de 0,3 milisegundos después de la liberación de cada paquete o descarga de acetilcolina procedente de las vesículas, se provoca la abertura de unos 2000 poros en la membrana de la célula muscular. Cada poro deja pasar tanto iones sodio como iones potasio. El flujo de estos iones (entrada de sodio a la célula y salida de potasio) da lugar a una corriente eléctrica neta que provoca un cortocircuito en el potencial normal de reposo que existe entre el exterior y el interior de la membrana celular, y cuyo valor es de -90 milivoltios; esta breve despolarización se conoce como potencial de placa terminal o potencial postsináptico de excitación. En condiciones normales, el potencial de placa terminal es superior al valor umbral necesario para la iniciación de un impulso que se propague por toda la membrana de la célula muscular y provoque la contracción de dicha célula.

Las moléculas transmisoras se quedarían en la hendiduda sináptica, saltando de un receptor a otro sobre la membrana de la célula muscular y abriendo cada vez más poros, si no fuera por el enzima acetilcolinesterasa, que hidroliza a la acetilcolina, dividiéndola en acetato y colina. Las moléculas del enzima no están empotradas en la membrana de la célula muscular como los receptores de acetilcolina; parecen estar asociadas con una matriz laxa de fibras de colágeno y mucopolisacáridos que serpentean por la hendidura sináptica y en el fondo de los pliegues de unión. Según una determinación reciente de Katz y Ricardo Miledi, del University College London, la acetilcolinesterasa destruye casi un tercio de las moléculas de acetilcolina, antes de que puedan siquiera alcanzar los receptores; luego actúa rápidamente sobre las moléculas restantes, conforme éstas van abandonando los receptores, lo que ocurre, aproximadamente, un milisegundo después de haberse unido a ellos. La velocidad de la unión y de la inactivación de la acetilcolina permite que todo el proceso de transmisión neuromuscular pueda repetirse hasta cientos de veces por segundo.

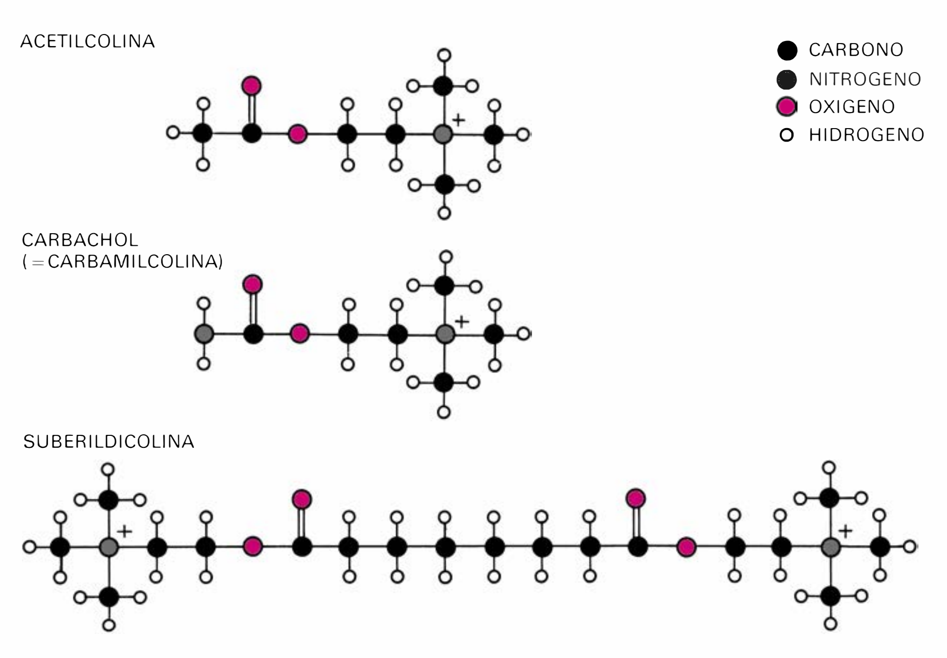
En los últimos años, se ha intentado correlacionar la información sobre la estructura real del receptor de la acetilcolina con su capacidad para unirse a ella y a compuestos conexos y con las propiedades de los poros para el paso de iones. Investigaciones de este tipo exigen métodos para identificar la proteína receptora tanto en solución como en fragmentos de membrana celular, en donde no se puede llevar a cabo mediciones electrofisiológicas. Esta tarea se ha simplificado por el descubrimiento de marcadores moleculares, que se unen al receptor de forma específica y casi irreversible.

Los citados marcadores se obtuvieron de una fuente exótica: el veneno de serpiente del grupo de los elápidos, tales como la cobra y el búngaro, que matan sus presas paralizándoles los músculos de la respiración. En las postrimerías de la década de 1950, Chen-Yuan Lee y sus colaboradores, de la Universidad Nacional de Taiwan, explicaron esta acción al demostrar que proteínas tales como la alfa-bungarotoxina del veneno del búngaro rayado (*Bungarus multicinctus*) bloquean la transmisión neuromus-

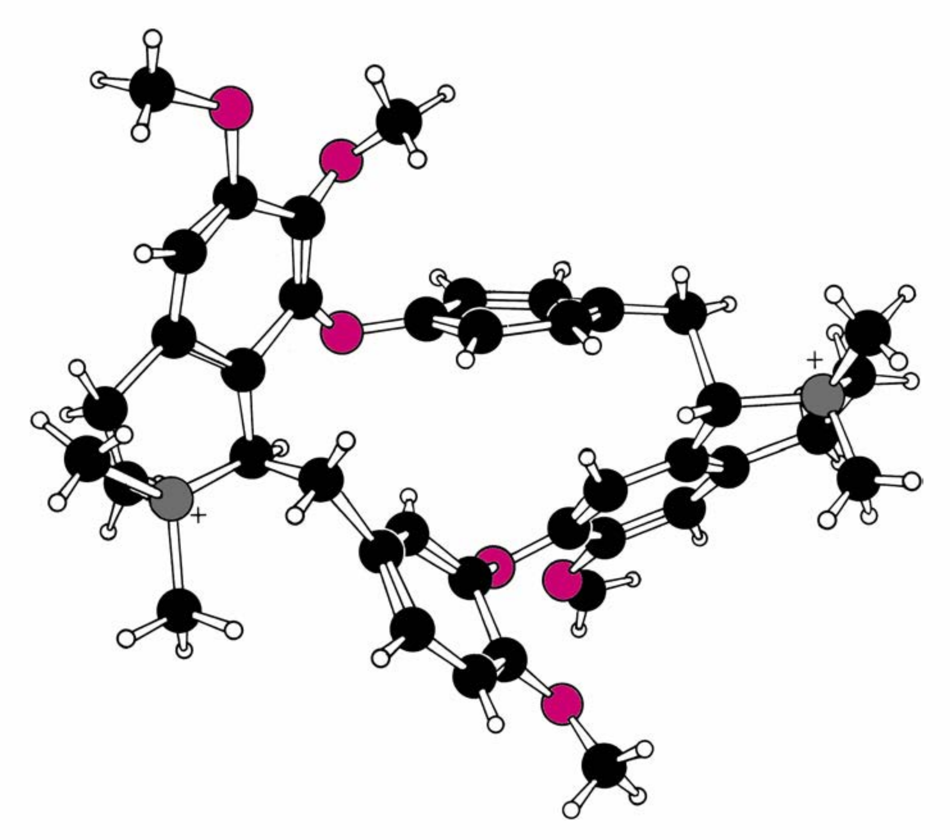
LA SINAPSIS NEUROMUSCULAR de la rana es lo que se representa en esta ilustración. Las finas ramificaciones terminales del axón de una neurona motora, que carecen de la vaina grasa de mielina que cubre el resto de la fibra, descansan en unas depresiones en forma de surco de la membrana de la célula muscular *(a)*. Cada región terminal está cubierta por una célula de Schwann, que la envuelve con prolongaciones en forma de dedos que subdividen a esta zona en compartimentos espaciados de forma regular, cuyo número oscila entre 300 y 1000 *(b)*. En el interior del terminal se encuentran unos grupos de vesículas sinápticas, o sacos, cada uno de los cuales contiene unas 10.000 moléculas de acetilcolina. Cuando llega un impulso al terminal, las vesículas se fusionan con la membrana, a lo largo de una doble hilera de partículas (denominada zona activa), y liberan su contenido en la hendidura sináptica. En *c* se muestra una de estas vesículas fusionadas. Luego, las moléculas del neurotransmisor atraviesan la hendidura por difusión y se unen con unos receptores específicos *(ovoides rojos)* que están empotrados en la membrana de la célula muscular, en las crestas de los pliegues de unión. La unión de la acetilcolina con los receptores abre unos poros en la membrana muscular, permitiendo así el flujo de los iones sodio y potasio a través de la membrana. El flujo de sodio hacia el interior de la célula es superior al flujo de potasio hacia el exterior, y el resultado es una corriente neta dirigida hacia el interior que provoca un cortocircuito en el estado de reposo de la membrana, eléctricamente polarizado. Esta despolarización desencadena un impulso mayor, que provoca la contracción de las fibras musculares. Posteriormente, la acetilcolina es destruida por moléculas del enzima acetilcolinesterasa *(bolas verdes)* que están distribuidas por toda la matriz fibrosa que rellena la hendidura sináptica.

cular. Más tarde, los experimentos realizados por el grupo de Lee, por otros varios investigadores y por mí mismo en la Universidad de Rockefeller (con una toxina de cobra purificada por David Eaker y sus colaboradores de la Universidad de Uppsala) demostraron que dichas toxinas bloquean el receptor de acetilcolina uniéndose a él de forma altamente específica. No presentan interacción con la acetilcolinesterasa ni interfieren en ninguno de los demás procesos de la acción neuromuscular normal; sólo se unen fuerte y casi irreversiblemente al receptor. El hecho adicional de que las toxinas de los elápidos sean fáciles de marcar con átomos radiactivos de yodo o hidrógeno las convierte en marcadores químicos ideales para el receptor de la acetilcolina.

Las toxinas de veneno de serpiente han sido útiles en varios aspectos. Primero, existen resoluciones en tubo de ensayo para la proteína receptora de fácil determinación y basadas precisamente en su unión con la toxina. Segundo, la autorradiografía de un tejido al que se ha unido la toxina radiactiva permite examinar la densidad y la distribución del receptor en membranas celulares intactas. Tercero, las toxinas se han utilizado para purificar el receptor mediante una técnica conocida como cromatografía de afinidad. En este procedimiento, las moléculas de toxina se fijan sobre gránulos de una sustancia sintética, el dextrano, que posteriormente se comprimen en una columna. Cuando se hace pasar por la columna una mezcla que contenga al receptor, éste se une a la toxina y, por tanto, a los gránulos, pero los demás compuestos atraviesan la columna sin detenerse. Luego se disocia el complejo toxina-receptor, haciendo pasar por la columna una elevada concentración de acetilcolina o algún compuesto similar, y se recoge el receptor para estudios posteriores.



LOS ACTIVADORES, tales como la acetilcolina y otros pocos compuestos semejantes, activan al receptor neuromuscular, permitiendo de esta manera que se produzca un flujo neto de iones con carga positiva a través de la membrana de la célula muscular. Todos los activadores poseen, por lo menos, un átomo de nitrógeno, cargado positivamente, que se une al receptor.



LOS INHIBIDORES, o sustancias bloqueantes de la transmisión neuromuscular, tales como el curare (aquí representado), parecen actuar uniéndose a una forma inactiva, o cerrada, del receptor de acetilcolina. El curare posee dos átomos de nitrógeno con carga positiva. Se trata de un agente paralizador que usan algunos indios sudamericanos para envenenar sus flechas de caza.

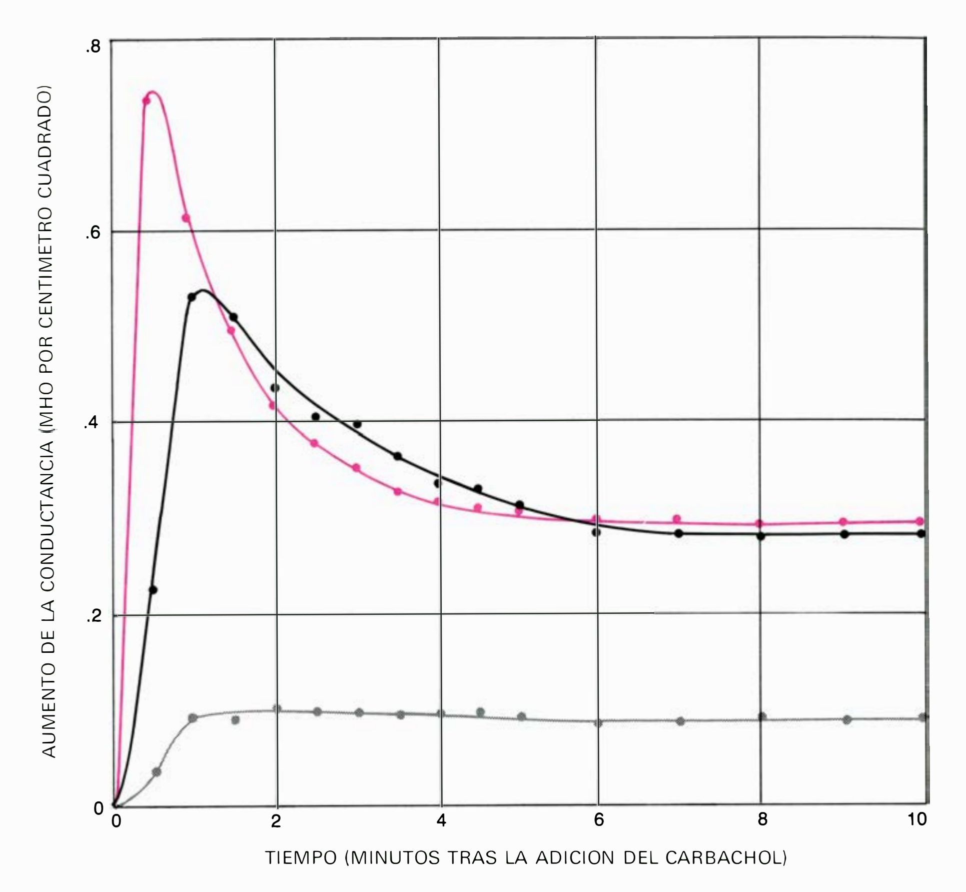
Lo que se necesitaba luego para llevar a cabo los experimentos bioquímicos era una fuente rica en receptor; esa necesidad fue satisfecha gracias a los órganos eléctricos de los peces eléctricos. En muchos de estos peces, el órgano eléctrico se desarrolla en el embrión a partir del mismo tipo de tejido que da lugar al músculo, pero, en lugar de células musculares, los órganos eléctricos están constituidos por células grandes y aplanadas, llamadas electroplacas. Estas células contienen un número escaso –o nulo– de filamentos contráctiles del tipo que caracteriza al músculo, pero tienen en común con las células musculares su sensibilidad a la acetilcolina. Una cara de la electroplaca (llamada cara inervada) recibe un gran número de terminales neurales que forman las sinapsis. Las sinapsis de las electroplacas funcionan de manera bastante semejante a las sinapsis neuromusculares: sus receptores de acetilcolina se activan con los mismos activadores (acetilcolina y algunos otros compuestos conexos), se inhiben con los mismos inhibidores (tales como las toxinas de serpiente y el curare) y se cree que en ellas interviene el mismo tipo de poro para el paso de iones.

Al igual que una célula muscular, la cara inervada de una electroplaca res-

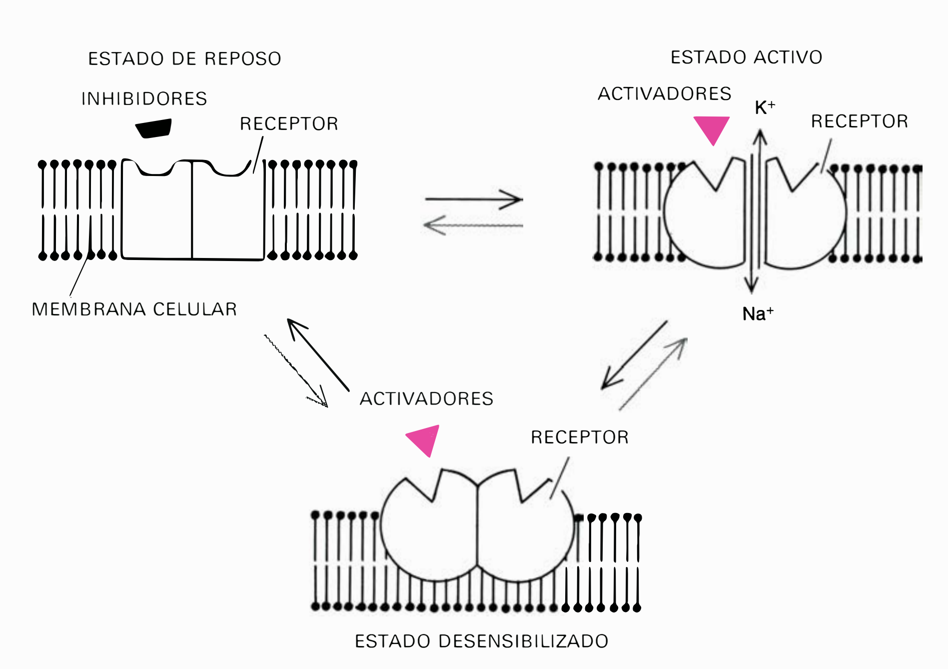
ponde a la acetilcolina con una entrada importante de iones sodio y una salida menor de iones potasio, dando como resultado un flujo neto de corriente eléctrica a través de la membrana celular. En un pez eléctrico marino típico, dicha corriente, al salir por la cara no inervada de la electroplaca, que está muy replegada (y no recibe ninguna sinapsis), cierra el circuito rodeando al pez. Las electroplacas están ordenadas en columnas de modo que su voltaje queda sumado como en las placas apiladas de un acumulador; a su vez, las columnas están dispuestas en paralelo de modo que su corriente también se suma.

Esta abundancia de electroplacas alcanza proporciones extraordinarias en los peces que utilizan sus órganos eléctricos para dar una descarga a su presa. Los órganos eléctricos de la raya eléctrica gigante *Torpedo* y de su pariente próximo *Narcine* tienen forma arriñonada y se extienden por casi todas las alas de la raya. Las electroplacas, que generan aproximadamente 0,1 voltios cada una, están ordenadas en columnas de 500 células; la suma del potencial que producen llega a un total de 50 voltios a 20 amperios. Dado que el 50 por ciento de la cara inervada de cada electroplaca perteneciente a *Torpedo* está constituido por receptores de acetilcolina, estas células son la fuente más rica que se conoce de la proteína receptora, disponible para experimentos bioquímicos. (Hasta el momento, los experimentos electrofisiológicos que se podrían realizar con este material se han visto obstruidos por dificultades técnicas.)

Otra familia de peces eléctricos cuenta con el *Electrophorus electricus*, que es la anguila gigante de agua dulce del trópico sudamericano. Este animal posee 4000 filas de electroplacas, lo cual representa casi el 70 por ciento de su masa y puede generar más de 600 voltios a un amperio. Sin embargo, en el caso de *Electrophorus*, la respuesta postsináptica a la acetilcolina constituye simplemente el mecanismo desencadenante de un impulso que se produce debido a los poros que están en las regiones no sinápticas de la membrana, como ocurre en las células musculares. En consecuencia, las electroplacas de *Electrophorus* tienen menos cantidad de receptores de acetilcolina que las electroplacas de *Torpedo*, en las que la totalidad de la corriente generada por el pez fluye a través de los poros propios de los receptores. No obstante, las electroplacas de *Electrophorus* tienen más receptores que el tejido muscular, y suelen servir como fuente del receptor de acetilcolina para experi-



LA RESPUESTA, DEPENDIENTE DEL TIEMPO, del receptor a tres concentraciones diferentes del activador carbachol indica que, cuando el activador es aplicado durante cortos períodos de tiempo, el número de poros iónicos abiertos aumenta con la concentración. Después de exposiciones prolongadas a elevadas concentraciones de activador, la respuesta de los receptores disminuye de forma muy marcada, fenómeno que se denomina desensibilización. Las concentraciones de activador son (por litro) 300 micromoles *(en color)*, 100 micromoles *(en negro)* y 30 micromoles *(en gris)*. La conductancia en mhos resulta igual al inverso de la resistencia en ohms.



EL MODELO TEORICO propuesto por Jean-Pierre Changeux, del Instituto Pasteur, explica los tres estados funcionales del receptor de la acetilcolina (en reposo, activo o abierto a los iones y desensibilizado) correlacionándolos con tres estados conformacionales diferentes de la proteína receptora. En ausencia de acetilcolina, la gran mayoría de los receptores se hallan en la conformación de reposo (cerrada). Cuando se libera la acetilcolina en la hendidura sináptica, prefiere unirse a la conformación activa, desplazando rápidamente la población de receptor hacia el estado de poro abierto. Tras largas exposiciones al activador, el receptor queda desplazado, a velocidad menor, hacia una conformación inactiva, o desensibilizada, que tiene una afinidad mayor que el activador. Los inhibidores tienden a estabilizar el estado de reposo o el desensibilizado, pero no el activo.

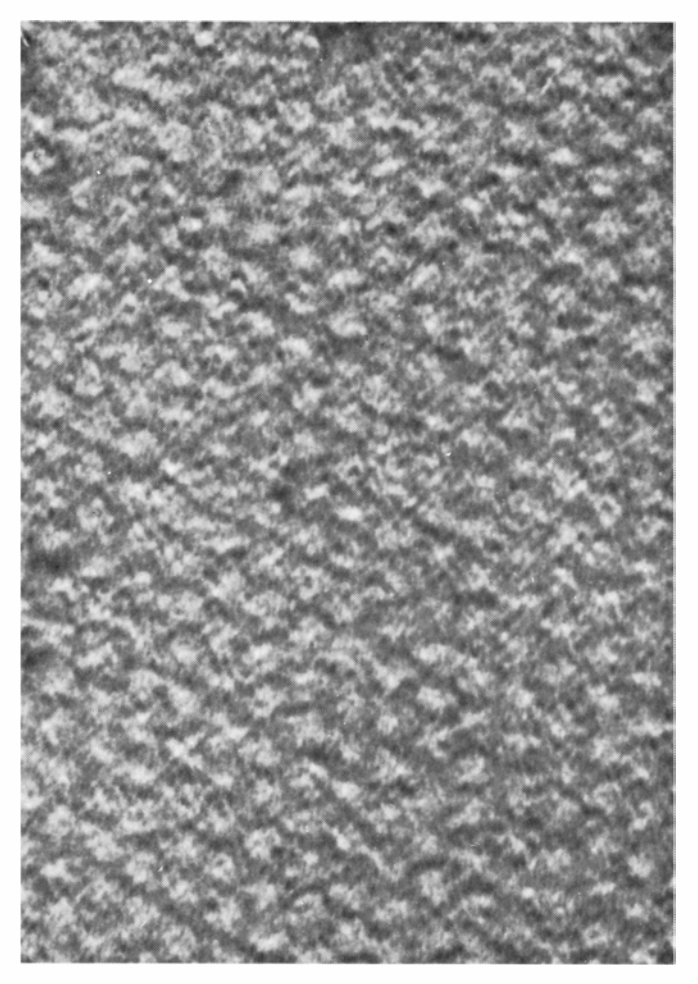
mentos bioquímicos y en investigaciones electrofisiológicas sobre la respuesta a la acetilcolina en células intactas.

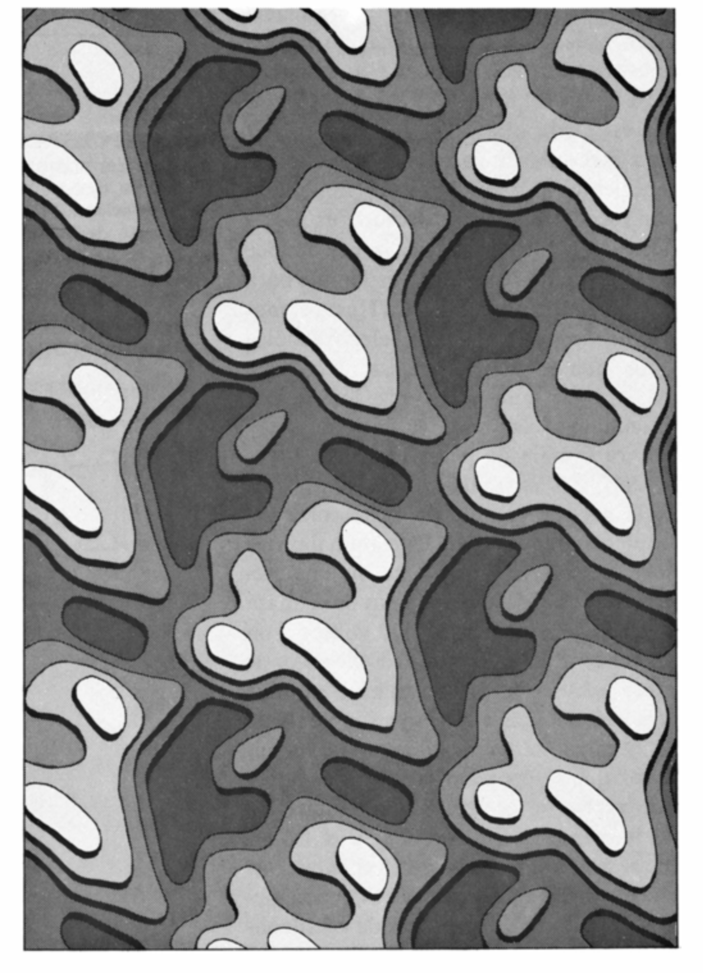
En 1971 y 1972, mediante el uso de detergentes, los investigadores de varios laboratorios consiguieron extraer de las membranas de electroplacas la molécula que se une a la toxina (que, según se cree, es el receptor). Posteriormente, se purificó el receptor varios miles de veces mediante cromatografía de afinidad y cromatografía clásica. Se trata de una gran molécula de proteína que probablemente posee regiones hidrófobas ("que odian el agua") en la parte que atraviesa la doble capa de moléculas lipídicas (grasas) de la membrana celular. También hay un pequeño número de moléculas de azúcar que están ligadas a la proteína. El interés actual se centra en las dos cuestiones siguientes: forma en que los activadores abren el poro en la membrana postsináptica y modo como los inhibidores bloquean el proceso.

De momento sólo se puede avanzar un informe sobre el adelanto conseguido en estos problemas. Hace unos 10 años, Arthur Karlin, del Columbia University College of Physicians and Surgeons, y Jean-Pierre Changeux y sus colaboradores, de la Universidad de California, en Berkeley, señalaron una posible analogía entre el receptor de acetilcolina y los enzimas reguladores, que son un tipo concreto de las proteínas que catalizan las reacciones bioquímicas. La velocidad de la reacción catalizada por un enzima de este tipo puede ser alterada por una sustancia llamada efector. La molécula del efector puede resultar estructuralmente muy diferente de la molécula sobre la que actúa el enzima, y se une al enzima en un lugar distinto del implicado en la catálisis, alterando por esta unión la actividad catalítica del enzima, al variar la conformación de la molécula enzimática, es decir, su estructura o plegamiento tridimensional.

La acetilcolina tiene poca semejanza química con los iones sodio y potasio que fluyen a través del poro de la membrana postsináptica. Se sugirió que, quizá, se podría considerar a la acetilcolina como un efector de la molécula del receptor de la membrana. Si así fuera, la abertura y el cierre del poro iónico serían análogos a las alteraciones de la actividad catalítica de los enzimas reguladores. Si fuera válida esta analogía, el lugar de unión de la acetilcolina y la vía de paso para los iones serían partes funcional y, quizá también, estructuralmente distintas del receptor; además, los cambios de conformación de la molécula de receptor serían los responsables de la respuesta a la acetilcolina.

Concretando más, lo que Karlin y Changeux propusieron independientemente fue que el receptor de acetilcolina de la membrana postsináptica puede oscilar entre dos conformaciones: una forma activa asociada con un poro abier-

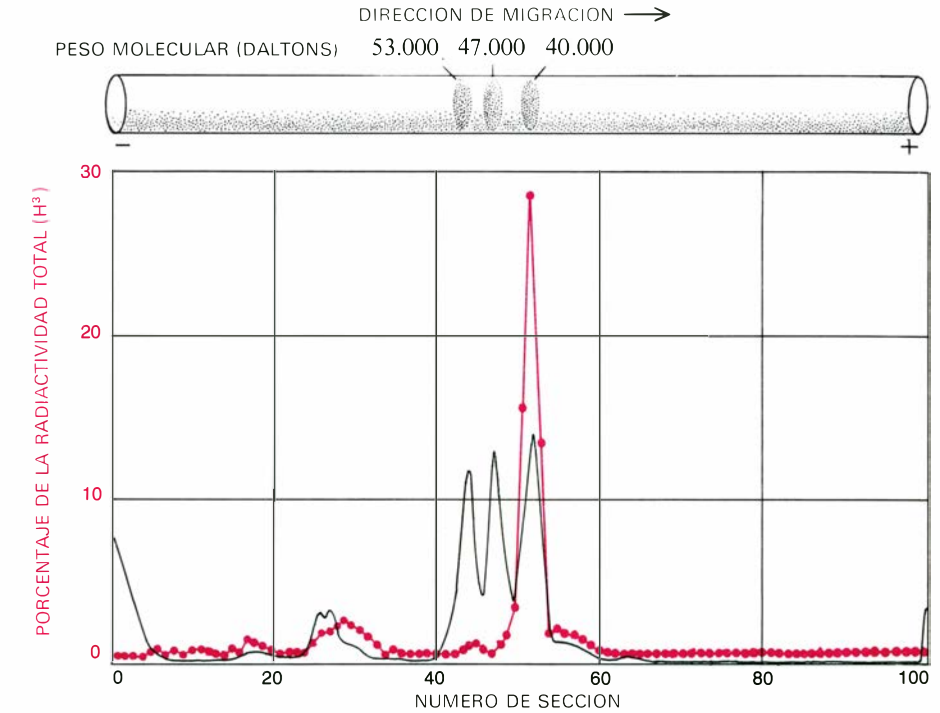




LA ORDENACION HEXAGONAL de los receptores de acetilcolina se muestra en esta microelectrografía, aumentada 750.000 veces, tomada sobre un fragmento de membrana sometido a tinción negativa, procedente de la cara inervada de una electroplaca de la raya eléctrica *Torpedo californica.* El mapa de densidad de la derecha es una imagen reconstruida de la ordenación de los receptores, con una resolución de 20 angstroms, obtenida por análisis de difracción electrónica, que es un proceso análogo al que se sigue al recortar muchas imágenes del receptor y superponerlas para obtener una imagen promedio. Se cree que cada forma que se repite en la imagen reconstruida es una molécula de receptor. Las moléculas están agrupadas de forma tan densa que prácticamente no hay espacio entre ellas en la membrana. La proteína receptora es sorprendentemente asimétrica, y la depresión que presenta su superficie se podría interpretar como la abertura del poro iónico. Esta microelectrografía fue realizada por Michael W. Klymkowsky, Michael J. Ross, Robert M. Stroud y Michael A. Raftery, del Instituto de Tecnología de California; el análisis de difracción electrónica fue llevado a cabo por R. Klymkowsky, D. A. Agard y Stroud.

to y una forma inactiva cerrada. En ausencia de activadores, el estado de equilibrio de la población de las moléculas del receptor favorece fuertemente la forma cerrada. Los activadores se unen a la forma activa y así desplazan el equilibrio hacia la conformación de poro abierto; los inhibidores se unen preferentemente a la forma inactiva, desplazando el equilibrio hacia la conformación de poro cerrado.

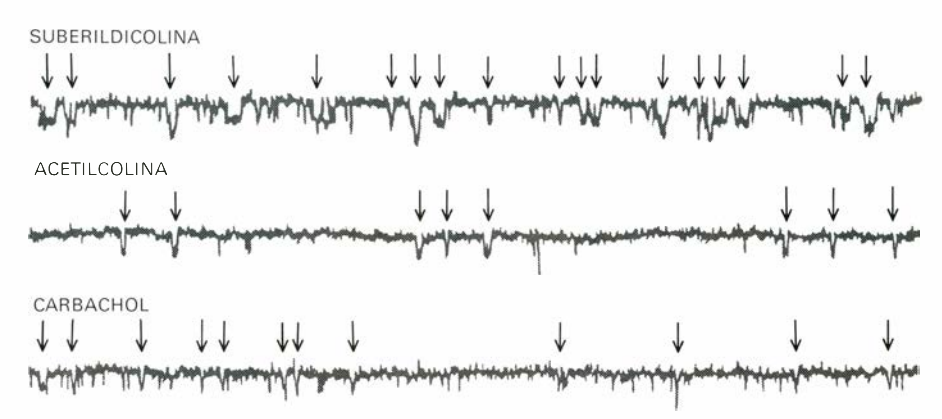
La mejor forma de comprobar dichas hipótesis es con fragmentos de membrana postsináptica intacta, que contengan al receptor; este medio probablemente es más natural que el de unas moléculas del receptor en una solución de detergente. En una investigación realizada en el Instituto Pasteur de París, Changeux y Jonathan B. Cohen usaron un compuesto fluorescente que se une al receptor de forma reversible tanto en el lugar de unión del activador como en otros lugares "secundarios", pudiendo así controlar los cambios de conformación de la proteína receptora. Se encontraron con que los activadores alteran el aspecto luminoso emitido por moléculas fluorescentes de prueba unidas a lugares secundarios, pero no así los inhibidores. Dado que dichos espectros son muy sensibles a las características fisicoquímicas del medio inmediato que rodea a la molécula de prueba, Changeux y Cohen concluyeron que la conformación que presenta la proteína receptora, en realidad, depende de si tiene un activador o un inhibidor unido a ella.



LA SUBUNIDAD QUE SE UNE A LA ACETILCOLINA, una de las varias subunidades de la proteína receptora, fue identificada por Arthur Karlin y sus colaboradores, del Columbia University College of Physicians and Surgeons. El compuesto de amonio cuaternario MBTA se une irreversiblemente al receptor en un lado que –se cree– es el mismo que el lado de unión del activador. Unos receptores purificados procedentes de electroplacas de *Electrophorus* fueron sometidos a la acción del MBTA marcado con radiactividad y luego se disoció a la proteína en sus tres tipos de subunidades componentes. Al someter las subunidades a una electroforesis sobre gel, se separaron en tres bandas según sus pesos moleculares. El gel fue teñido *(arriba)*, sometido a un análisis continuo mediante un densitómetro *(negro)* y recortado en secciones que luego se examinaron una por una para determinar su radiactividad *(color)*.

Existía una complicación en el modelo del receptor, que estaba preocupando a Changeux cuando, en 1971, llegué a su laboratorio del Instituto Pasteur, siendo estudiante de postdoctorado. Desde hacía algún tiempo, se sabía que los enzimas reguladores podían volverse insensibles a sus efectores. También se sabía que, cuando se somete a los receptores a una elevada concentración de activador durante un tiempo prolongado, los poros de los receptores se abren con menor frecuencia. Este fenómeno, denominado desensibilización, puede ser insignificante a la escala de tiempo del orden de milisegundos en que trabaja la sinapsis, pero tiene aplicaciones clínicas: el decametonio suele comportarse como un activador, pero, si se inyecta en la circulación, desensibiliza los receptores de las células musculares y relaja a los músculos. Katz y Stephen Thesleff sugirieron, en 1957, que quizá la desensibilización implicaría una unión del activador con el receptor que fuera mucho más fuerte, y mucho más lenta, que la unión que induce la abertura del poro. Varios resultados recientes corroboran esa hipótesis. Por ejemplo, Changeux y el autor han comprobado que, si se aplica el activador carbachol a electroplacas de *Electrophorus*, lo bastante rápido como para impedir la desensibilización, se necesita una concentración de 300 micromoles de carbachol por litro para abrir la mitad de los poros. Sin embargo, en experimentos de unión "lenta" con fragmentos de membrana y con receptores en solución, la mitad de los receptores poseen el activador unido a ellos cuando la concentración de carbachol es tan sólo de 10 micromoles por litro.

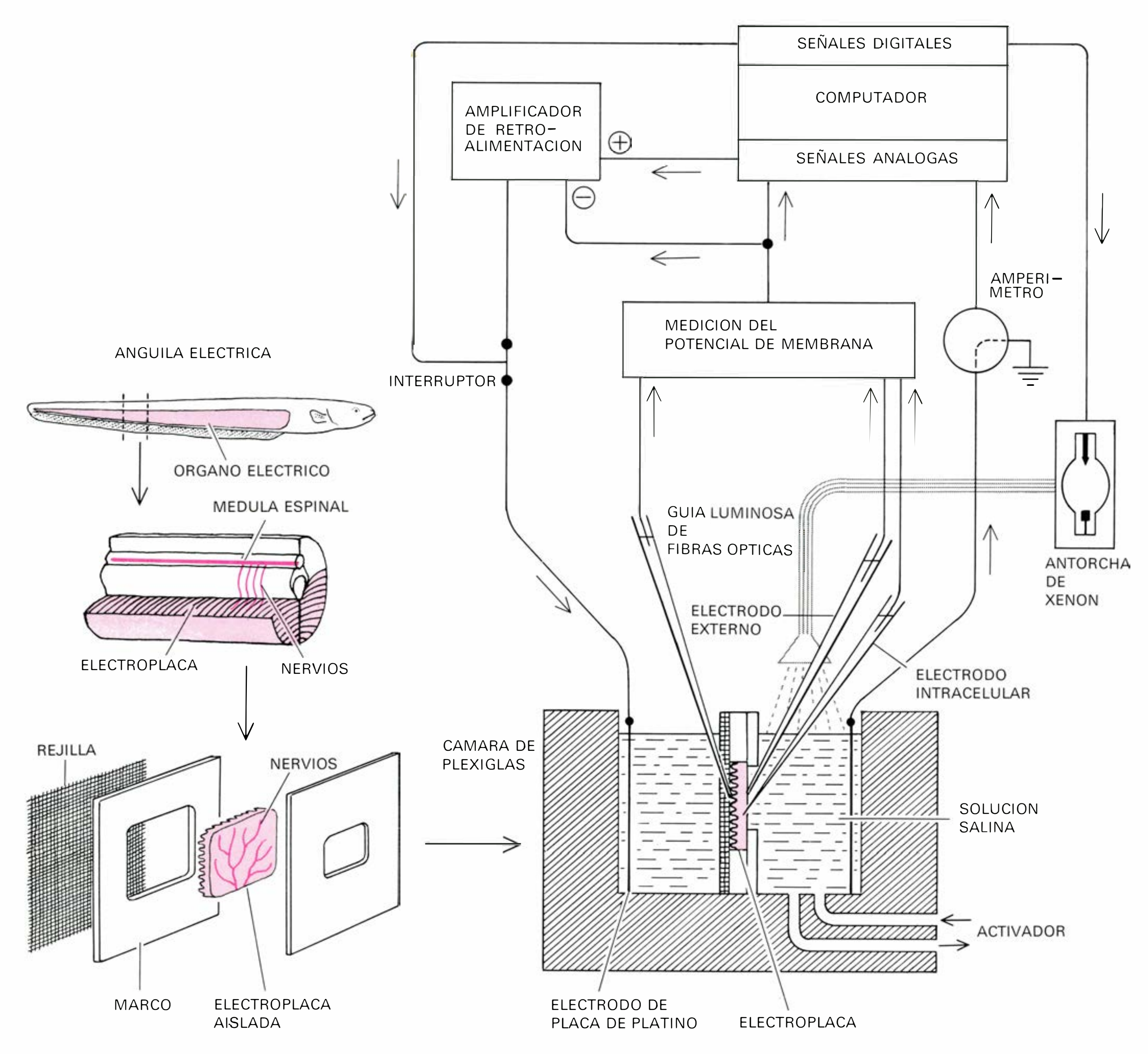
Estas y otras observaciones indujeron



EL FLUJO DE IONES, que atraviesa los distintos poros del receptor de acetilcolina en el músculo de la rana, fue registrado, en circunstancias excepcionalmente favorables, por E. Neher y Bert Sakmann, del Instituto Max Planck de química biofísica, de Gotinga. Se presionaba contra la membrana muscular la punta de una micropipeta que contenía activador y solución fisiológica, aislando así una pequeña porción de membrana que comprendía varios centenares de poros. Se ajustaban las condiciones de manera que el activador abriera un solo poro cada vez permitiendo que el flujo de corriente eléctrica pasara a través de un amperímetro electrónico conectado con el líquido de la pipeta. Aquí se presentan los registros de una pantalla de osciloscopio, en donde cada poro produce un impulso de corriente que tiene forma cuadrada y que dura unos milisegundos *(flechas verticales)*. Los poros abiertos por la suberildicolina siguen abiertos más tiempo que los abiertos por la acetilcolina, mientras que el efecto del carbachol resulta más breve todavía.

a postular la existencia de una tercera conformación de la molécula del receptor, que correspondería al estado desensibilizado. Según este modelo, unos chorros cortos de activador, que duraran aproximadamente un milisegundo, desplazarían rápidamente el equilibrio de la población de moléculas de receptor hacia la conformación de poro abierto, mientras que las exposiciones más prolongadas darían lugar a un desplazamiento más lento de los receptores hacia una conformación desensibilizada –con una unión muy fuerte– en la que el poro está cerrado. Este modelo modificado del receptor, de tipo enzima-regulador, también explica los diversos efectos de los inhibidores si se supone que se unen preferentemente a las conformaciones de reposo o desensibilizada, pero no a la conformación activa.

Apareció otra analogía entre el receptor y los enzimas reguladores, en una observación realizada por Katz y Thesleff al medir la respuesta de los receptores a bajas concentraciones de los activadores. La curva que describe esta relación no es lineal sino que tiene una concavidad que mira hacia arriba: si se duplica la concentración del activador, el número de poros abiertos queda prácticamente cuadruplicado. Parece que la presencia del activador en la cercanía de los receptores no sólo activa algunos poros sino que hace que otros receptores se vuelvan más sensibles a una cantidad adicional de activador. Los enzimas reguladores también presentan

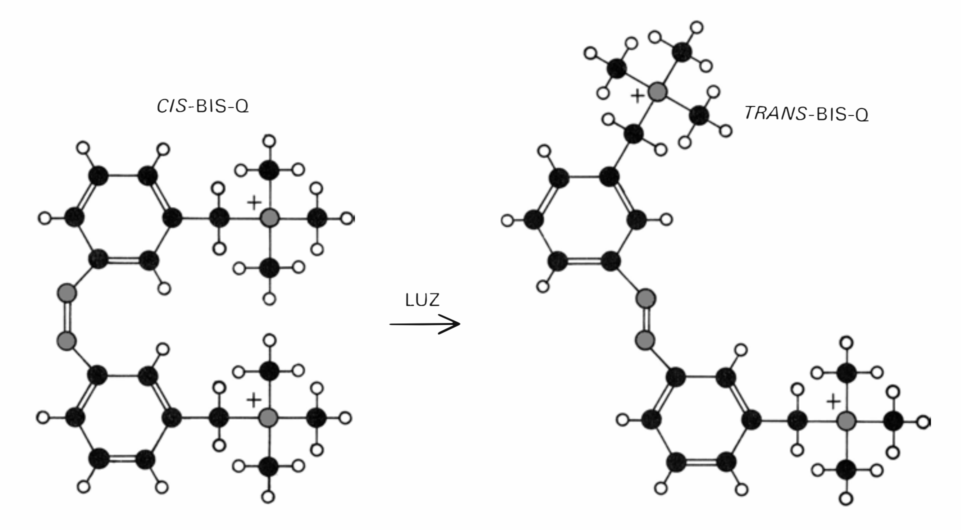


ESTABILIZADOR DE POTENCIAL que permite mantener o fijar en un valor constante la diferencia de potencial entre un lado y otro de la membrana inervada de una electroplaca, a fin de poder obtener una medición directa del movimiento de iones a través de los poros de los receptores. Se coloca verticalmente, en una pequeña cámara de plexiglás, una electroplaca aislada, de aproximadamente un centímetro de largo, con parte de la cara inervada de la célula en contacto con una solución salina que contiene activadores y otros compuestos de prueba. La diferencia de potencial entre ambos costados de la cara inervada es detectada por tres electrodos de micropipeta, uno interno y dos externos. En el amplificador "de retroalimentación", este potencial se compara con el establecido por la computadora; si son diferentes, y si la computadora ha abierto el interruptor electrónico, el amplificador "de retroalimentación" introduce una corriente correctora a través de la placa de platino y a través de la membrana celular, haciendo volver su potencial al nivel prefijado. Un amperímetro electrónico, conectado a una de las placas, mide la corriente cuyo valor es conjugado con el potencial medido dentro de la computadora, que, finalmente, da la conductancia de la membrana. En algunos experimentos, el computador provoca la emisión de un destello de una antorcha de xenón, que actúa rápidamente convirtiendo el isómero inactivo *cis* del potente activador bis-Q en el isómero activo *trans.*

este comportamiento "cooperativo"; se origina por la presencia de varios centros catalíticos de la molécula enzimática, cada uno de ellos perteneciente a una de las subunidades que componen la molécula. La molécula enzimática entera ejerce su función con mucho mayor eficacia cuando todos los centros están activos. Quizá sea más probable que el estado abierto del poro receptor esté relacionado con la unión de dos moléculas de activador que con la unión de una sola.

Cuando se purifican las proteínas de los receptores de *Electrophorus* y de *Torpedo*, y se someten a condiciones que disocian a cualquier proteína en sus subunidades componentes, se encuentran moléculas proteicas menores, cuyos pesos moleculares oscilan entre 39.000 y 67.000 daltons. Parecen existir tres tipos de subunidades en el receptor purificado de *Electrophorus* y cuatro en el de *Torpedo;* aún no se conoce el número de copias de cada subunidad por molécula. El examen de receptores de electroplaca purificados, al microscopio electrónico, realizado por Jean Cartaud, de la Universidad de París, y André Sobel y Changeux, del Instituto Pasteur, ha puesto de manifiesto que poseen una estructura en "roseta", que comprende cinco o seis subunidades con un orificio central o foso.

Las funciones de las respectivas subunidades son desconocidas, con una excepción. Karlin y sus compañeros han sintetizado un compuesto marcado con radiactividad, que se une irreversiblemente con el receptor purificado por medio de un grupo químico reactivo que lleva asociado. (Esta unión es bloqueada por algunos activadores e inhibidores, posiblemente porque todos los compuestos se unen en el mismo lugar.) Si después de la unión se disocia al receptor marcado en sus subunidades componentes, sólo la más pequeña es radiactiva. Por tanto, esta subunidad podría estar implicada en la unión con la acetilcolina. Además, Michael A. Raftery y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de California, han identificado dos tipos de lado de unión; ambos se presentan en igual número sobre la misma molécula de receptor, pero difieren en su afinidad por el activador. Esta observación apoyaría la existencia de un número igual de lados de unión por molécula de receptor, y este número probablemente sería dos o cuatro. El problema que queda ahora por resolver es, por una parte, correlacionar los complejos estados funcionales del receptor con los cambios en las interacciones entre sus distintas subunidades



EL PASO INDUCIDO POR LA LUZ del isómero inactivo *cis*, del activador bis-Q, al isómero activo *trans* fue utilizado por el autor y sus colaboradores para provocar un brusco aumento de la concentración de activador que bañaba la cara inervada de una electroplaca. La reacción de isomerización fue producida mediante un destello de un milisegundo, procedente de una antorcha de xenón, y proyectado sobre la cámara por medio de una guía luminosa de fibras ópticas. La solución de activador se analizó para poder determinar las concentraciones de ambos isómeros.

componentes y, por otra, averiguar la naturaleza molecular del mecanismo de compuerta que abre o pone al descubierto el poro iónico.

En 1970, Katz y Miledi abrieron el camino de un nuevo enfoque electrofisiológico aplicado al estudio de la activación del receptor de la acetilcolina, al demostrar que podía calcularse la conductancia eléctrica originada en un solo poro abierto en la membrana postsináptica. Al hacer registros de células musculares de rana con electrodos de micropipeta, comprobaron que una aplicación continuada de acetilcolina produce una despolarización "ruidosa" en la membrana de la célula muscular, en lugar de una despolarización perfectamente uniforme. Por ejemplo, en un experimento en que se aplicaba una cantidad de acetilcolina suficiente para despolarizar la membrana por término medio en unos 8,5 milivoltios, se produjeron pequeñas variaciones adicionales, sobre una escala de tiempo de milisegundos, y estas variaciones se podían describir matemáticamente, de acuerdo con el siguiente postulado: la conductancia inducida por la acetilcolina presenta fluctuaciones con una desviación típica cuyo valor es 0,005 del valor medio.

Estas fluctuaciones serían precisamente las que se esperarían si, de hecho, la respuesta a la acetilcolina fuera la suma de las respuestas de los diversos poros que se abren y se cierran a una velocidad media determinada, produciéndose cada suceso molecular independientemente del vecino. En dicho caso, el número medio aproximado de poros abiertos, de un momento al siguiente, es igual al cuadrado de la desviación típica respecto al valor medio. Por ejemplo, la conductancia media anteriormente mencionada –que es 200 veces mayor que la desviación típica– implica la existencia de 200^2, es decir, 40.000 poros abiertos simultáneamente. Basándose en este esquema, Katz y Miledi pudieron estimar la conductancia de un solo poro al dividir por 40.000 el valor medido como conductancia media. Unos perfeccionamientos de su técnica han probado que, cada milisegundo durante el cual permanece abierto un poro, se produce una entrada neta de 12.000 iones en la célula siguiente o postsináptica.

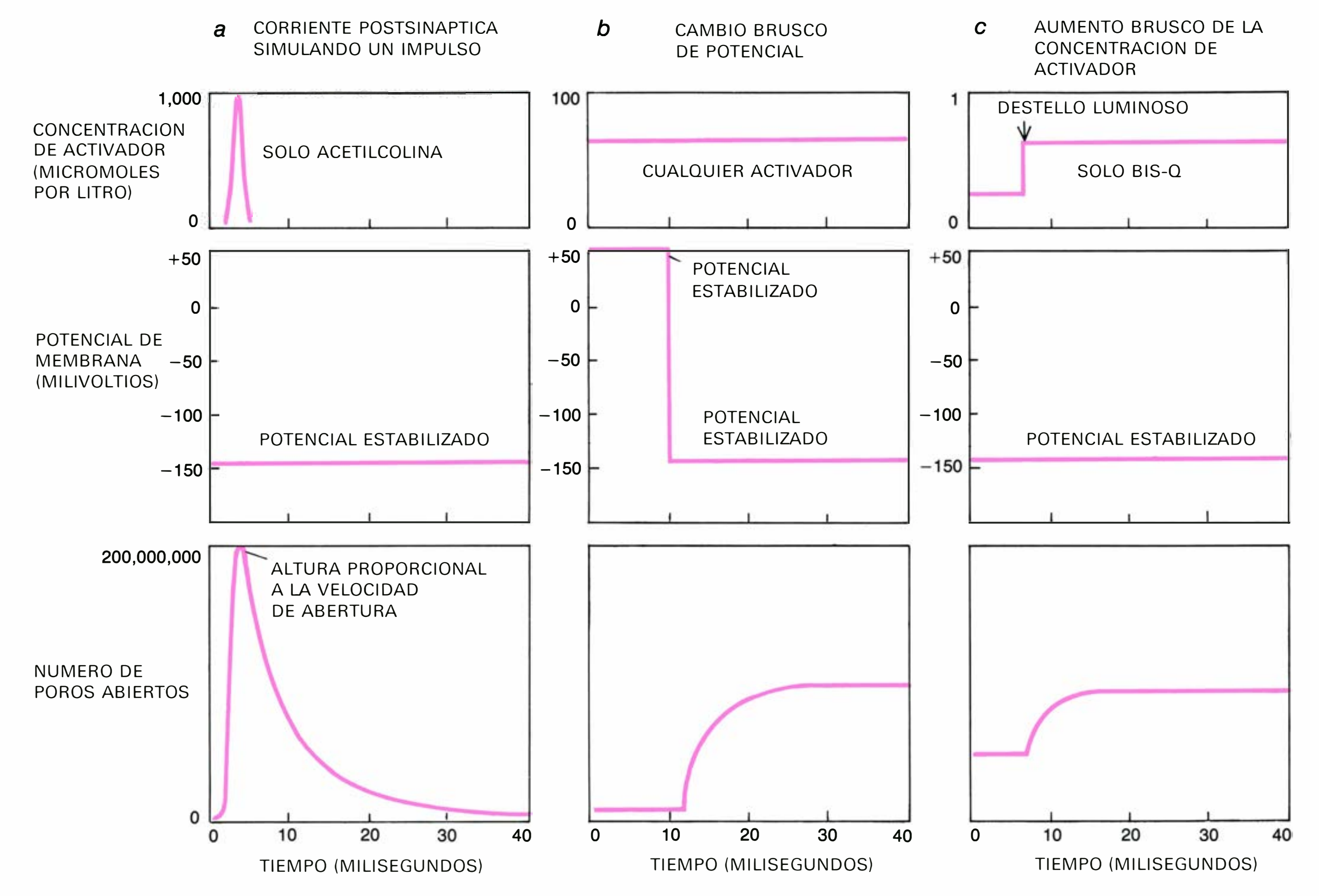
Este concepto de poro fue confirmado de forma sorprendente por unas mediciones recientes realizadas, en poros aislados, por Erwin Neher y Bert Sakmann, que trabajaron juntos en el Instituto Max Planck de química biofísica de Gotinga y en la Escuela de Medicina de la Universidad de Yale. Aprovechando las ventajas de algunos perfeccionamientos técnicos, presionaron contra la membrana muscular la punta de una micropipeta que contenía activador en solución fisiológica; cuando el activador abría alguno de los poros situados en la punta de la micropipeta, la corriente eléctrica resultante pasaba a través de un amperímetro electrónico conectado con el líquido de la pipeta. Los resultados iniciales muestran que cada poro produce un pulso de corriente que tiene forma cuadrada y que dura pocos milisegundos. En consecuencia, las aberturas de los poros parecen ser sucesos estadísticos moleculares que siguen la ley del todo o nada.

A temperatura ambiente, un poro per-

manece abierto aproximadamente un milisegundo si el activador es acetilcolina; durante un tiempo un 50 por ciento mayor, si es suberildicolina, y durante un tercio de aquel tiempo, si es carbachol (un activador que los investigadores usan con frecuencia porque no es hidrolizado por la acetilcolinesterasa). Además, por cada 10 grados Celsius que baja la temperatura, los poros permanecen abiertos durante un tiempo tres veces mayor. Los inhibidores no varían la conductancia o vida media del poro; lo único que hacen es disminuir la frecuencia de los sucesos de abertura.

Charles F. Stevens y sus colaboradores, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Washington, han demostrado que, en el músculo de la rana, la vida media del poro abierto también depende del potencial que existe entre uno y otro lado de la membrana postsináptica: los poros de los receptores se cierran con mayor rapidez cuando la membrana se halla despolarizada. En mi laboratorio del Instituto de Tecnología de California encontré, con Robert E. Sheridan, que lo mismo ocurre en las placas de *Electrophorus*.

¿Y por qué depende del potencial de membrana la vida media del poro del receptor? Podría ser que, en las células musculares y en las electroplacas que aquí hemos considerado, el potencial postsináptico de despolarización sirva sencillamente como mecanismo desencadenante de un impulso que se propagaría por toda la membrana de la célula postsináptica, produciéndose así una despolarización mucho mayor. Por tanto, el impulso tendería a cerrar los mismos poros que lo iniciaron. Además, es probable que la acetilcolina abandone al receptor en el momento en que el poro se cierra y, una vez se halla libre en la hendidura sináptica, pueda ser inactivada por la acetilcolinesterasa a una velocidad incluso superior a la que se daría en ausencia de un impulso. Además de preparar la sinapsis para el siguiente estímulo presináptico, dicho mecanismo impide que los poros del receptor produzcan un cortocircuito en el impulso que abarca a toda la membrana e interfieran en su propagación, aunque en el músculo esto se produce en cierto grado. En electroplacas de *Electrophorus,* el efecto es de importancia crucial, como lo han señalado Harry Grundfest,



LOS EXPERIMENTOS DE RELAJACION, realizados en el laboratorio del autor con el estabilizador de potencial, miden la velocidad de apertura y de cierre de los poros de los receptores de la membrana de la electroplaca. Esto se lleva a cabo examinando el tiempo requerido para que la población de poros alcance un nuevo estado de equilibrio tras haber sido perturbada. La primera perturbación, que consiste en un breve chorro de activador *(a),* se produce al provocar un impulso en los terminales, que responden liberando acetilcolina. Puesto que la sustancia transmisora es hidrolizada por el enzima acetilcolinesterasa en el espacio de pocos milisegundos, la población de poros se abre de forma sincrónica, y luego se cierra a una velocidad que revela la vida media del poro. El segundo tipo de perturbación se basa en la observación de que el poro permanece abierto durante un tiempo mayor (la velocidad de cierre disminuye) si el potencial de membrana se hace más negativo. En presencia de una concentración constante de activador, primero se mantiene el potencial de la membrana de la electroplaca a +50 voltios y, luego, se pasa rápidamente a –150 voltios *(b).* La población de poros varía así hasta alcanzar un nuevo equilibrio con una constante de tiempo cuyo valor recíproco es igual a la suma de las velocidades de apertura y de cierre. El tercer experimento de perturbación se inicia con la electroplaca sumergida en una solución que contiene al isómero inactivo de bis-Q *(c).* Un destello luminoso convierte parte de este compuesto en su isómero activo, y la población de poros se reajusta con la misma constante de tiempo que la obtenida en el experimento de cambio brusco de potencial. Dado que el primer experimento nos permite conocer la velocidad de cierre y que los experimentos segundo y tercero nos descubren la suma de las velocidades de apertura y de cierre, resulta fácil calcular la velocidad de apertura. A una temperatura de 15 grados, una concentración del activador de 30 micromoles por litro y potencial de membrana de –90 milivoltios, los poros se abren cada tres milisegundos.

del Columbia College of Physicians and Surgeons, y Michael V. L. Bennett, del Albert Einstein College of Medicine, de Nueva York; el pez tiene que dirigir su corriente eléctrica hacia el agua dulce circundante, que posee una resistencia elevada. Cualquier cortocircuito en las membranas de sus electroplacas reduciría drásticamente su eficacia en la emisión de descargas hacia sus presas.

A fin de obtener más información sobre los factores que gobiernan la transición entre poros abiertos y cerrados, ideé, con mis colaboradores, una serie de experimentos en electroplacas individuales de *Electrophorus*. En vez de observar las fluctuaciones espontáneas en torno al estado de equilibrio, produjimos cambios rápidos e importantes en las condiciones que determinan el estado de equilibrio y luego medimos el tiempo que tardaba la población de receptores en "relajarse", hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Usamos un aparato contabilizador del potencial que fija o mantiene el potencial de la membrana a un nivel que es escogido por el experimentador, de manera que no puedan producirse las despolarizaciones habituales. El aparato mide y genera la cantidad de corriente necesaria para mantener el potencial. Esta corriente es proporcional al número de poros abiertos en la membrana, y el circuito sigue los cambios que se dan en la población de poros en una fracción de milisegundo. Por ejemplo, si se estabiliza la membrana en el potencial normal de reposo y no hay ningún poro de receptor abierto, no se necesita ninguna corriente. Luego, cualquier poro que se abra contribuye a producir el mismo. incremento de corriente. Para los experimentos sobre poros de receptor, se debe aprovechar varias drogas que tienen un efecto de bloqueo y varias técnicas de sustracción, a fin de eliminar las corrientes iónicas debidas a otros tipos de poros, tales como los que dan lugar al impulso propagador de la membrana de la célula muscular, una vez alcanzado su umbral.

Nuestros primeros experimentos se basaban en el trabajo de Stevens y colaboradores, que habían comprobado, en una serie de experimentos de estabilización del potencial en músculo de rana, que en determinadas condiciones un impulso presináptico estimula al terminal para que libere un chorro de acetilcolina lo suficientemente corto como para dar lugar a la abertura, casi sincrónica, de los poros iónicos. Cuando está activa la acetilcolinesterasa, las moláculas de la sustancia transmisora libres desaparecen completamente de la hendidura sináptica, antes de que una porción significativa de los poros abiertos haya sufrido la transición al estado de cierre. Aunque no se sabe con seguridad cómo se difunden las moléculas de acetilcolina en la hendidura sináptica durante el breve período de tiempo en que los poros se están abriendo, los sucesos posteriores representan la relajación de los poros tras la eliminación instantánea de la sustancia transmisora de la hendidura. Al igual que las fluctuaciones y las mediciones en un solo poro, esta respuesta postsináptica mide la vida media de un poro abierto. Lo primero que demostraron los experimentos de este tipo fue que este período (o su recíproco, es decir, la velocidad de cierre del poro) dependía, de forma muy marcada, del potencial al que estaba estabilizada la membrana.

En nuestros experimentos de estabilización del voltaje, nos interesaba en especial medir la velocidad de apertura de los poros iónicos a una concentración de activador determinada y a un potencial de membrana determinado. Con Sheridan, hicimos otro tipo de experimento de relajación, a fin de hallar tales valores. En presencia de concentraciones constantes de activador, la membrana de *Electrophorus* se mantuvo, en primer lugar, a un voltaje y luego se cambió rápidamente a otro. Por tanto, el circuito estabilizador de voltaje nos servía tanto para iniciar la relajación como para medir el número de poros abiertos. La población de poros no se ajustaba instantáneamente al valor de equilibrio apropiado al nuevo nivel de potencial, pero se relajaba con una constante de tiempo cuyo valor recíproco era igual a la suma de las velocidades de abertura y de cierre de poro. Puesto que ya se conocía la velocidad de cierre por las mediciones con el chorro de acetilcolina, el experimento permitió determinar la velocidad de apertura.

Una vez conocidas las velocidades de apertura y de cierre, podemos reconstruir el comportamiento de los poros cuando están sometidos al activador durante tiempos breves o prolongados. Por ejemplo, a una temperatura de 15 grados C, y a un potencial de –90 milivoltios (que es el potencial de reposo de la membrana), la acetilcolina abre el poro durante 3 milisegundos, por término medio. Comprobamos que, una vez un poro está cerrado, una concentración de acetilcolina de 30 micromoles por litro puede hacer que se reabra en unos 3 milisegundos. Aún no estamos seguros de si la velocidad de abertura está limitada por el número de choques efectivos entre el activador y la molécula del receptor, o si es por alguna transición en la conformación de la proteína receptora. Sea cual fuere el factor limitante de la velocidad, se suponía que en estas condiciones experimentales, la mitad de los poros estarían abiertos, en cualquier momento determinado, y nuestros resultados concuerdan *grosso modo* con esta predicción. Al aumentar la concentración de activador, los poros se abren con mayor frecuencia. Sin embargo, a diferencia de la velocidad de cierre, la velocidad de apertura parece ser independiente del potencial de membrana.

Hace poco, Hai Won Chang, del Columbia College of Physicians and Surgeons, y el autor midieron la relajación de una forma más directa: hicieron variar de repente la concentración de activador. Se trabajó con un compuesto artificial conocido como bis-Q, que tiene dos formas moleculares. Una, el isómero *trans*, es un activador potente. La otra, el isómero *cis*, tiene escaso efecto sobre los receptores de acetilcolina. Ambas formas son mutuamente convertibles mediante luz de longitudes de onda adecuadas.

El experimento se iniciaba con una electroplaca de *Electrophorus* colocada en una solución cuyo contenido principal era la forma *cis* de bis-Q. Se hacía llegar a la cámara experimental una luz procedente de una antorcha de xenón, mediante una guía luminosa de fibras ópticas. Durante el destello, que duraba un milisegundo, algunas de las moléculas *cis* se transformaban en la forma activa *trans*. Entonces, la población de moléculas de receptor pasaba a un estado de poro abierto, no de forma instantánea sino con un período de tiempo que coincidía precisamente con el necesario para permitir la relajación, tras un cambio repentino de potencial en las mismas condiciones. Nos interesa continuar con este experimento, porque un cambio brusco de activador es evidentemente lo que activa los poros de los receptores en la sinapsis operante *in vivo*.

Stephen W. Kuffler y sus colaboradores, de la Harvard Medical School, han estudiado recientemente, con minucioso detalle, las respuestas normales que acabamos de mencionar. Calculan que, después de la liberación en la hendidura sináptica de una sola descarga de acetilcolina (probablemente el contenido de una sola vesícula sináptica), la concentración de la sustancia transmisora no es la de 30 micromoles por litro que lleva a la activación de la mitad de los poros, sino que es, por lo menos, de

300 micromoles por litro durante 0,3 milisegundos. Kuffler y sus colaboradores también estiman que abren sus poros aproximadamente de un medio a tres cuartos de los receptores sometidos a esa concentración durante ese tiempo. Helen C. Fertuck y Miriam M. Salpeter, de la Universidad de Cornell, sobre la base de unos estudios recientes a través del microscopio electrónico, han calculado que la concentración de acetilcolina en la hendidura sináptica es mucho mayor, de más de 1000 micromoles por litro. Dado que nuestros experimentos sugieren que la velocidad de apertura del poro aumenta al elevarse la concentración, es fácil comprender que más de la mitad de los poros pueden estar abiertos sólo 0,3 milisegundos después de la liberación de una descarga de acetilcolina.

Me permitiré resumir ahora los sucesos neurofisiológicos que conducen a la generación de un impulso en la membrana de la célula muscular. Respondiendo al impulso recibido en el terminal neural presináptico, unas 100 vesículas sinápticas liberan su contenido de forma sincrónica en distintas zonas de liberación a lo largo de la sinapsis. Luego, las moléculas de acetilcolina contenidas en cada vesícula abren aproximadamente 2000 poros de receptor en la membrana de la célula muscular, produciendo así una pequeña despolarización llamada potencial de placa terminal en miniatura. Los 100 potenciales de placa terminal en miniatura, originados por el contenido de 100 vesículas sinápticas, se suman, dando lugar a un potencial postsináptico de excitación, que desencadena el impulso propagado en la membrana de la célula muscular, con lo que se provoca la contracción de la fibra muscular. Se puede concluir que el potencial de placa terminal es el resultado de unos 200.000 sucesos de apertura de poro y de un flujo neto de aproximadamente tres mil millones de iones a través de la membrana de la célula muscular.

Además de la sinapsis neuromuscular, hay cientos de tipos distintos de sinapsis en el cerebro y en el resto del sistema nervioso, la mayoría de las cuales no tienen a la acetilcolina como sustancia química transmisora. Algunas de estas sustancias no son excitadoras, sino inhibidoras de los impulsos postsinápticos. Muchas actúan a una escala de tiempo bastante mayor, pudiendo incluso algunas cambiar sus características tras su funcionamiento. La investigación de estas sustancias revelará, sin duda, principios neurobiológicos nuevos y sorprendentes.

Juegos matemáticos

Snarks, Boojums y otras conjeturas relativas al llamado teorema del mapa de cuatro colores

Martin Gardner

"... lo buscaron con cuidado:
lo persiguieron con horquetas
y esperanza."

LEWIS CARROLL

En su forma más simple, la conjetura de los cuatro colores enuncia que bastan cuatro colores distintos para colorear un mapa cualquiera, de modo que nunca haya dos regiones adyacentes del mismo color. En el momento presente, el más renombrado de los matemáticos convencidos de haber demostrado dicha conjetura es Joseph Miller Thomas. Su demostración, publicada en 1969 en un folleto editado a sus expensas, figura ahora en su libro *A Primer on Roots,* que puede solicitarse al autor. (Su dirección es 60 Slocum Street, Philadelphia, Pa. 19119 U.S.A.) Debo añadir que Thomas ha sido editor del *Duke Mathematical Journal,* y es autor de varios textos excelentes de álgebra moderna. Su demostración recibió acerada crítica en *Mathematical Reviews* por Frank R. Bernhart, autoridad en la conjetura que nos ocupa. En un congreso matemático celebrado en 1975, mientras Bernhart daba una conferencia titulada "Cómo no demostrar la conjetura de los cuatro colores", Thomas se levantó para defenderse. Me han contado que la atmósfera era tensa; no era imposible que llegasen a las manos. Bernhart tiene en alta estima algunas ideas de la demostración de Thomas; pero es mucho mayor la baja opinión que Thomas tiene de Bernhart.

Cierto número de distinguidos matemáticos, entre ellos H. S. M. Coxeter, creen que el teorema es falso. "Si hubiera de atreverme a emitir un veredicto", escribió Coxeter en 1959, "presumiría que puede existir un mapa que requiera cinco colores, si bien el más sencillo poseería tantas regiones (posiblemente centenares o millares) que nadie... tendría la paciencia necesaria para efectuar las imprescindibles comprobaciones." La clásica *Introduction to Geometry* de Coxeter dedica una sección al teorema, encabezada por la siguiente cita de *Through the Looking Glass:*

"Lo dudo", dijo el carpintero,
y lloró de amargura

Un mapa contraejemplo, si existe, habrá de tener más de 51 regiones. Esta nueva acotación inferior mejora considerablemente la demostración, dada por Oysten Ore en 1968, de la imposibilidad de hallar contra ejemplos de 39 o menor número de regiones. La nueva cifra ha sido establecida por Walter Stromquist basándose en nuevas configuraciones reducibles descubiertas por Bernhart y.

Muchas presuntas demostraciones del teorema de los cuatro colores confunden esta conjetura con un teorema más sencillo, que es fácil demostrar; a saber: no se puede dibujar en el plano más de cuatro regiones de modo que cada par de ellas comparta un segmento de frontera común. Incluso sin caer en esta confusión, resulta atractivo imaginar que este hecho permite demostrar que todo mapa plano (o de una superficie esférica, que es topológicamente equivalente) puede colorearse de modo que, con sólo cuatro colores, ningún par de regiones del mismo color tenga frontera común. Desdichadamente, es posible (por lo que hasta ahora se sabe) que un mapa de más de 51 regiones esté estructurado de modo tal que sea imposible iluminarlo con sólo cuatro colores. Todo intento a tal fin, con sólo cuatro colores, conducirá sin remedio a un lugar donde coincidirán dos colores iguales. Evidentemente, alterada la distribución de colores, podrá evitarse que el conflicto se produzca en un lugar determinado, pero entonces surgirá en algún otro lugar.

Hay docenas de otras conjeturas, sin aparente relación con mapa alguno, que son equivalentes al teorema de los cuatro colores, en el sentido de que si es posible decidir una de ellas, también lo es el problema de los colores. ¿Es siempre posible, rebanando los vértices de un poliedro convexo, conseguir que cada una de sus caras sea un polígono cuyo número de lados sea múltiplo de tres? ¡Si ello es posible, la conjetura de los colores es verdadera! Por ejemplo, truncando cuatro vértices de un cubo, de modo que ningún par de estos vértices esté diagonalmente opuesto, se obtiene un sólido con cuatro caras triangulares y seis hexagonales.

Si se pudiera hallar un poliedro convexo imposible de transformar adecuadamente por truncamiento de sus vértices, se habría hallado un sólido cuyo esqueleto produciría un mapa para el cual el teorema de los colores sería falso.

Un método mucho más sencillo de búsqueda de mapas contraejemplo consiste en tratar de hallar un grafo (un conjunto de puntos, llamados vértices, unidos por líneas, llamadas bordes) que tenga las siguientes propiedades:

1. Sea conexo (esté formado por una sola pieza).

Obtención de un mapa trivalente

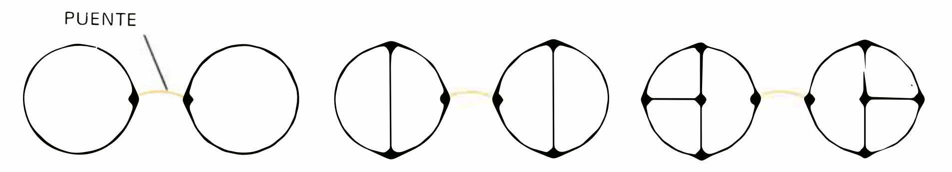
2. Sea planar (pueda dibujarse en el plano sin que sus bordes se corten).
3. No tenga puentes (o istmos). Un puente es un borde cuya eliminación descompone al grafo en dos piezas desconectadas.
4. Sea trivalente (que en cada vértice concurran tres bordes).
5. No sea tricoloreable (que sea posible pintar los bordes de tres colores de forma que en todos los vértices se encuentren siempre los tres).

A fin de explicarlo con mayor detalle, retrocedamos hasta un artículo publicado en 1880 por Peter G. Tait, físico-matemático de la Universidad de Edimburgo. Tait mostró cuán sencillamente puede transformarse todo mapa en otro trivalente con las mismas propiedades de coloreado. Si en un vértice concurren más de tres bordes, se rodea con un círculo y se borran su interior y uno de los arcos que en él determinan los bordes *(véase la ilustración de la página anterior).* Un vértice de n bordes se convierte en una región ampliada, rodeada por n-2 vértices trivalentes. Es evidente que cualquier coloreado de las nuevas regiones servirá para colorear el mapa primitivo. No es necesario estudiar los vértices con sólo dos bordes, pues pueden considerarse como un punto de un borde, y despreciarse. En resumen, todo mapa puede transformarse en una red de líneas de ramificación trivalentes, que constituyen un mapa trivalente; y si el mapa trivalente puede colorearse con cuatro colores, lo mismo vale para el mapa primitivo. Tait demostró que si cuatro colores son suficientes para las regiones de un mapa planar trivalente, tres lo son para los bordes de su grafo, y recíprocamente.

La equivalencia anterior resulta evidente, procediendo como sigue. Supongamos que las regiones de un mapa planar trivalente estén pintadas con los colores A, B, C y D. Asignemos a cada borde una letra, "suma" de las de sus regiones adyacentes, mediante la siguiente tabla de sumar:

$$A + B = B$$
$$A + C = C$$
$$A + D = D$$
$$B + C = D$$
$$B + D = C$$
$$C + D = B$$

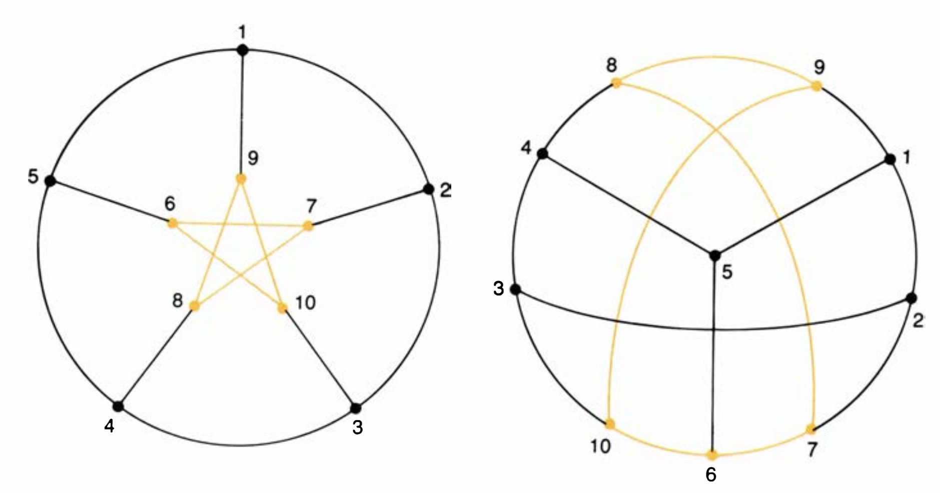
Se obtiene así una tricoloración de los bordes. Para colorear las regiones a partir de un colorido de sus bordes, supongamos que éstos tengan los colores B, C y D. Pongamos A en una región cualquiera. Tomemos, saliendo de A, un camino arbitrario que pase una sola vez por cada región. Al atravesar un borde, se marca la nueva región con la "suma" del borde y de la nueva región visitada; si las letras son distintas, se usa la tabla de sumar anterior; si son iguales, la nueva región se marca A. De esta forma, las regiones quedan teñidas de cuatro colores.



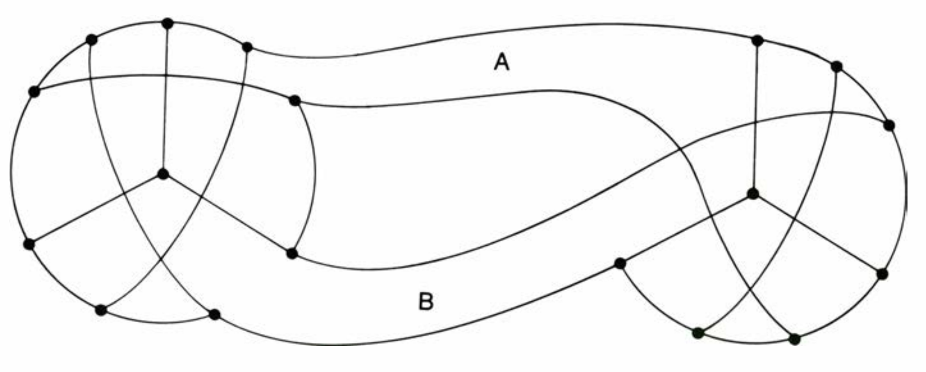
Mapas trivalentes con puentes

Tait creyó que todos los grafos trivalentes son tricoloreables (y, por consiguiente, que todo mapa puede iluminarse con cuatro colores), pero no tomó en consideración dos tipos de grafos trivalentes que no son tricoloreables. Una clase es la formada por los mapas trivalentes con puentes. En la figura de la parte superior de esta página se muestran tres grafos sencillos de este tipo. Es evidente que los dos lazos del primero hacen imposible tricolorearlo; y es casi igual de trivial que los otros dos tampoco pueden tricolorearse. Tales grafos no pueden, desde luego, corresponder a mapas legítimos, pues el puente sería la línea divisoria que separaría la región exterior –que si el mapa se traza sobre una esfera, es una región conexa– de sí misma. (Cuando se traza un mapa plano, el "exterior" ha de considerarse como región.) El puente sería una frontera absurda: tras cruzarla, se permanecería en la misma región.

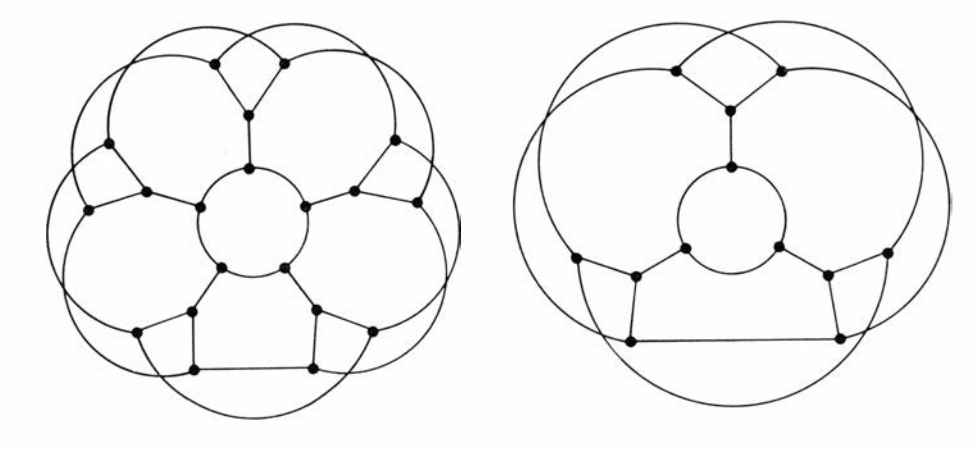
La otra clase de mapas trivalentes no coloreables, que Tait omitió, está formada por mapas no-planares (imposibles de dibujar en el plano sin que se corten sus bordes). El ejemplo más sencillo, conocido como grafo de Petersen, se muestra en la ilustración superior de la figura situada abajo. Habitualmente, los textos presentan la configuración izquierda. Rufus Isaacs, especialista en matemática aplicada, de la Universidad de Johns Hopkins, conocido por sus trabajos en teoría de juegos, prefiere la configuración de la derecha. Para dibujarla se necesitan menos trazos, y todos sus vértices, excepto uno, se hallan

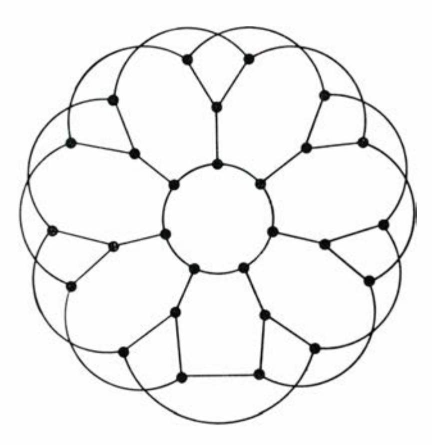


Dos trazados del grafo de Petersen

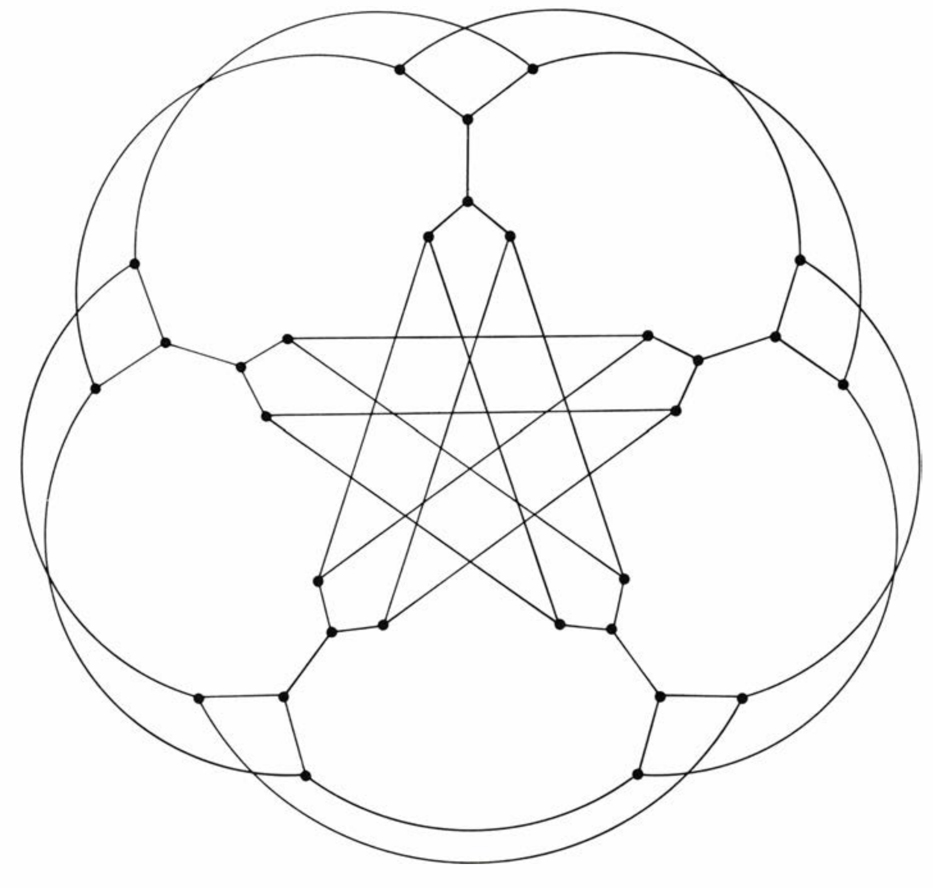


Un grafo de Blanuša obtenido con dos de Petersen





Primeros tres miembros de un género infinito de Snarks



Una variedad salvaje: el Snark "doble estrella"

en el contorno, pudiendo usarse para "enganchar" el grafo a otros, como se explicará más adelante. Repasando cada grafo a lo largo de sus bordes, en el orden indicado por los puntos, se comprueba fácilmente que ambos son topológicamente idénticos. La estrella interior se ha coloreado para hacer más patente el isomorfismo.

¿Qué podemos concluir de todo lo anterior? Si existe un grafo trivalente no coloreable, equivalente a un mapa que invalide el teorema de los cuatro colores, tal grafo ha de ser trivalente, planar y carecer de puentes. No se ha encontrado ningún grafo de estas características, y no se le aconseja al lector su búsqueda. Por otra parte, como recientemente ha descubierto Isaacs, la búsqueda de grafos no planares, imposible de "Taitcolorear" (tricolorear) puede ser un pasatiempo delicioso. El libro de Isaacs, *Differential Games* (Robert E. Krieger, 1975) ha suministrado material para varios artículos míos. Los resultados de sus investigaciones acerca de los grafos trivalentes no coloreables se encuentran en su fascinante artículo "Infinite Families of Nontrivial Trivalent Graphs Which Are Not Tait Colorable", en *The American Mathematical Monthly*, vol. 82, n.º 3, págs. 221-239; marzo, 1975.

Para Isaacs, "no trivial" significa, fundamentalmente, sin puentes. Es tan sencillo hacer incoloreable un grafo añadiéndole un puente, que podemos despreciar todos los grafos con puentes, y ceñirnos al estudio de los que no los poseen. Isaacs también considera triviales los grafos con un "dígono" o un "triángulo" (cuyo significado se explica más abajo), pues son características triviales que pueden añadirse o eliminarse de un grafo no coloreable sin alterar esta propiedad.

Para evitar la repetición constante de "no trivial, no coloreable, trivalente" (nontrivial uncolorable trivalent, en inglés) sería conveniente disponer de un término adecuado. Mi primera idea fue el acróstico NUT (tuerca), que podría sugerir que tales grafos son difíciles de hallar, como pasa con las tuercas cuando caen al suelo. De hecho, con palabras de Isaacs, quienquiera que los busque "quedará vivamente impresionado por la rabiosa imposibilidad de hallar" uno tan siquiera. A pesar de esto, NUT podría interpretarse en el sentido de que su búsqueda requiere tener "algún tornillo suelto", siendo, en realidad, un importante problema matemático. Tan valioso sería desenredar el problema de definir y clasificar todos los tipos de grafos trivalentes no coloreables no triviales,

como demostrar el teorema de los cuatro colores. Si tal problema llegase a resolverse, y se pudiera demostrar que dichos grafos son todos ellos planares, el problema del mapa de cuatro colores estaría resuelto.

Yo propongo que los grafos trivalentes, no triviales y no coloreables, se denominen *Snarks* (animal imaginario, inventado por Lewis Carroll en su poema *The Hunting of the Snark*). Un grafo trivalente es una red de caminos que se trifurcan, y quien intente demostrar que no es coloreable no tiene otros medios que "horquetas y esperanza" (forks and hope), al igual que la descabellada expedición a la caza del Snark en la inmortal balada de Carroll. Sabemos que los Snarks son difíciles de encontrar, y que hay una variedad, superlativamente rara y peligrosa, llamada Boojum. En nuestra terminología, el Boojum no es sino el Snark planar: el grafo trivalente que haría saltar por los aires la conjetura del mapa de cuatro colores proporcionando un contraejemplo. Si alguien descubre un Boojum, se verá instantáneamente proyectado, junto con el grafo, al hiperespacio. Quizá sea ésta la razón de que el problema continúe sin resolver.

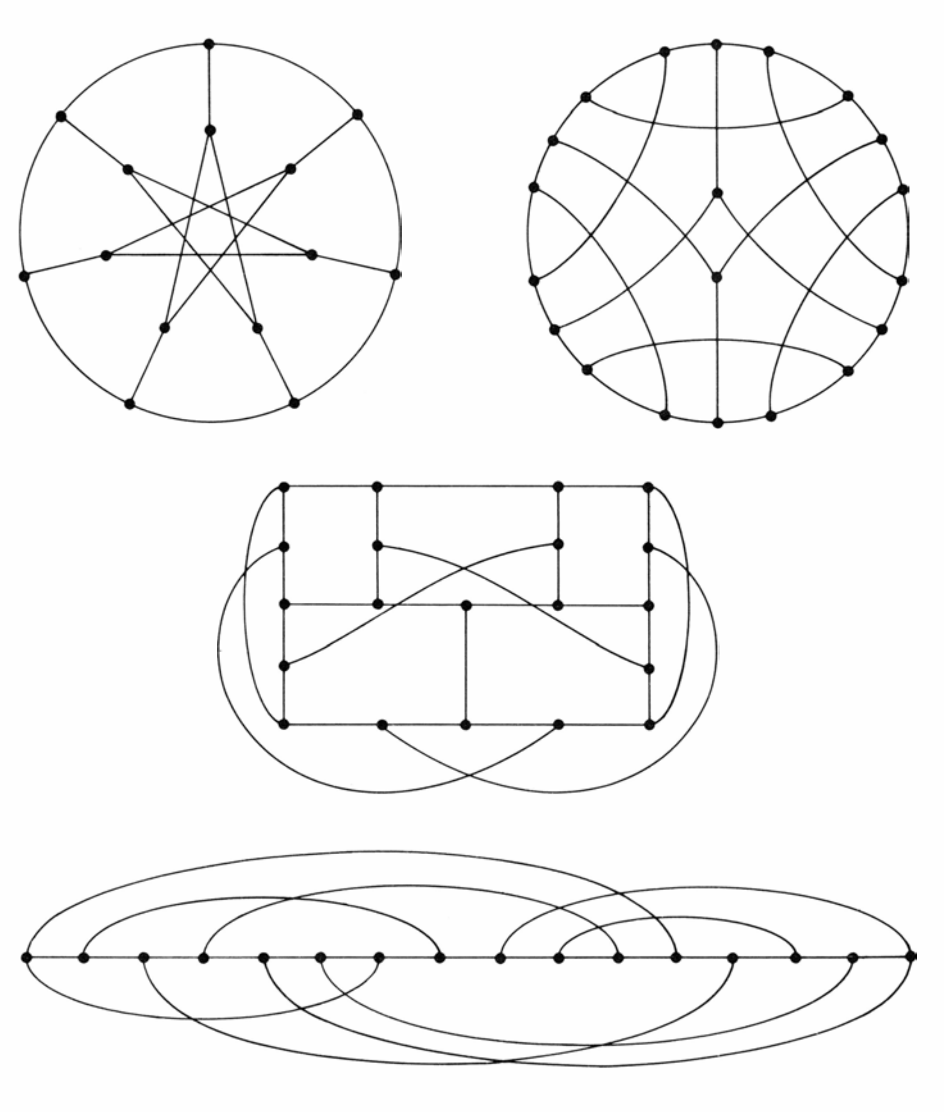
El grafo de Petersen, publicado en 1891, es no sólo el mínimo Snark posible sino que también (como ha demostrado W. T. Tutte, gran especialista en teoría de grafos) es el único Snark cuyo pelaje tiene solamente 10 manchas. Cuesta creerlo, pero transcurrió más de medio siglo antes que se descubriera el segundo Snark (18 puntos), por Danilo Blanuša, lo cual hizo público en 1946. Dos años después, Blanche Descartes publicó un Snark de 210 vértices. El cuarto (50 vértices) apareció en 1973, publicado por G. Szekeres.

El principal resultado de la expedición de Isaacs fue el descubrimiento de dos conjuntos infinitos de Snarks. Uno de ellos contiene los grafos de Blanuša, Descartes y Szekeres. Isaacs los llama grafos BDS, en honor de los tres matemáticos, cuyo trabajo fue base del suyo. Los grafos se forman enganchando entre sí grafos ya conocidos como no coloreables, y, también, enganchando otros grafos arbitrarios. Aunque Blanuša no se dio cuenta del hecho, su grafo puede obtenerse uniendo dos grafos de Petersen tal como se muestra en la ilustración inferior de la página 103 . Se suprimen dos bordes no adyacentes del grafo de Petersen izquierdo; se hace lo propio con los tres bordes adyacentes y sus dos vértices ausentes en el grafo de Petersen de la derecha. Se enganchan entre sí ambos grafos, tal como se indica. El par de bordes *A* puede cruzarse o no, y lo mismo vale para el par *B*. Además, en *A* y en *B* (o en ambos), se pueden enganchar grafos arbitrarios sin modificar las propiedades de coloración. Dos grafos no coloreables cualesquiera pueden unirse de este modo, con o sin grafos arbitrarios adicionales, originando una infinidad de Snarks. El grafo de Szekeres se forma enganchando entre sí cinco grafos de Petersen. El grafo de Descartes es una combinación de grafos de Petersen con nonágonos. Los lectores interesados en estas construcciones pueden consultar el artículo de Isaacs, donde se detallan.

El segundo conjunto infinito de Snarks hallado por Isaacs se muestra en la ilustración superior de la página anterior. El primer grafo es el de Petersen, en el que se ha sustituido el vértice central por un "triángulo" trivial de tres puntos. Aumentando el número de pétalos grandes en la sucesión 3, 5, 7, 9,... se obtiene un conjunto infinito de Snarks florescentes de 12, 20, 28, 36,.... vértices. Incidentalmente, todos los grafos trivalentes tienen forzosamente un número par de vértices. Si tal número es $2n$, el número de bordes será $3n$, y, si el grafo es tricoloreable, tendrá n bordes de cada color.

Isaacs descubrió también un Snark de una variedad silvestre con 30 vértices, que no pertenece ni a la familia BDS ni a la floriforme, que él denomina estrella doble. Esta puede engancharse a los grafos BDS, lo mismo que los floriformes, y estos últimos conectarse entre sí. Las posibilidades de combinación son infinitas; se puede dibujar grafos BDS complejos que resultan extremadamente difíciles de descomponer.

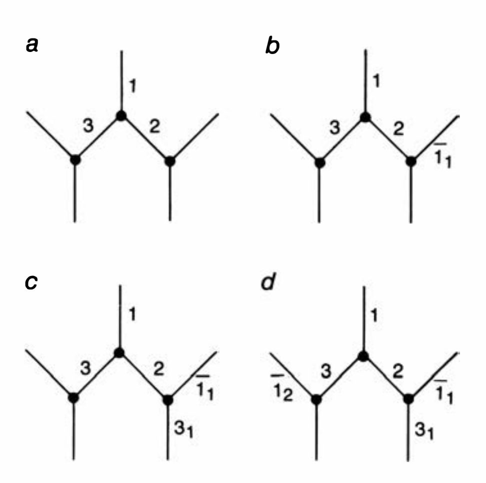
A fin de iniciar a los lectores en la apasionante caza de los Snarks, se presentan en la ilustración de esta página cuatro grafos trivalentes simples, que son tricoloreables. Se invita a los lectores a que vean con qué rapidez pueden tricolorear uno cualquiera de ellos, o los cuatro. El grafo inferior está dibujado en forma canónica. Evidentemente, cualquier grafo puede deformarse análogamente a fin



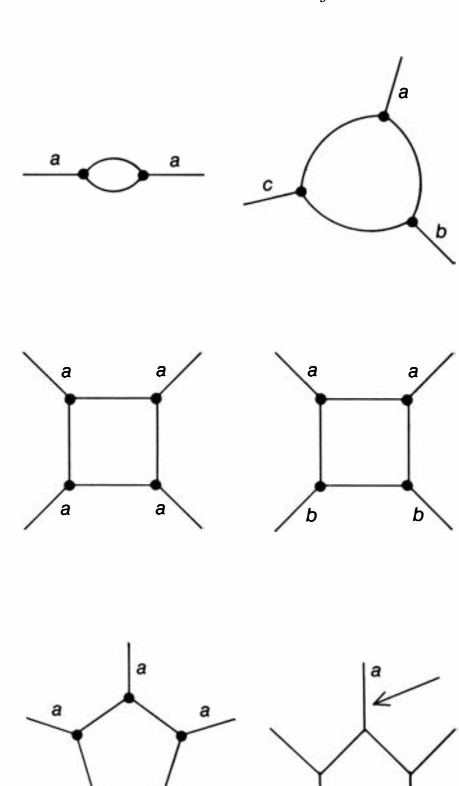
Grafos trivalentes y tricoloreables

de que todos sus vértices se encuentren en línea recta. Después de practicar un poco las tricoloraciones, puede que el lector desee abordar la tarea, más difícil, de demostrar que el grafo de Petersen, o cualquiera de los otros Snarks, no es tricoloreable. Para lograrlo es necesario ensayar todos los posibles métodos de coloración, lo que puede requerir gran cantidad de tiempo, en especial, si el método empleado no es eficiente.

El siguiente algoritmo regresivo, que no se da en el artículo de Isaacs, es el más eficaz que él ha encontrado tanto para colorear grafos trivalentes como para demostrar la imposibilidad de tricolorearlos. Aunque puede hacerse aún más eficiente usando grafos sumamente grandes y pequeñas fichas numeradas, lo describiré para aplicarlo usando lápiz y papel *(véase la ilustración superior izquierda de esta misma página).*



Proceso de coloreado de Rufus Isaacs



Indicaciones útiles

1. Se dibuja con tinta el grafo a escala grande. Los colores se representan por 1, 2 y 3. Al marcar los bordes debe usarse un lápiz blando, pues podrá ser necesario borrar muchas veces.

2. Se toma un vértice cualquiera y se rotulan los tres bordes que en él concurren con 1, 2 y 3. No importa cómo se asignen los números, pues tan sólo representan colores distintos y no se pierde generalidad al permutarlos.

3. Se pasa a un vértice contiguo. Sus dos vértices no numerados pueden rotularse de dos modos. En nuestro ejemplo, el borde superior puede ser 1 o 3. Lo marcamos 1, poniendo sobre esta cifra una barra para recordar que está elegido libremente. Se añade el subíndice 1 para señalar que es la primera elección libre. Este subíndice será denominado número de paso.

4. Se rotulan todos los bordes unívocamente determinados por la primera elección libre. En nuestro ejemplo tan sólo hay uno, que recibe un 3. Se le pone el mismo número de paso (subíndice 1). No se pone barra sobre el 3, porque éste viene forzado.

5. Se pasa a otro vértice adyacente donde pueda hacerse una elección libre. Lo mismo que antes, la primera elección recibe una barra, pero ahora el subíndice es 2, para mostrar que es la segunda elección libre.

6. Se continúa de este modo hasta que todo el grafo esté rotulado o se encuentre una contradicción, es decir, una elección forzosa que pone dos bordes del mismo color en un mismo vértice. Si así ocurre en el paso *n,* se borran todos los rótulos de subíndice *n.* Conviene borrar el rótulo barrado por encima en último lugar.

7. Se hace la otra elección posible en el paso *n.* Esta vez, sin embargo, no se le pone barra. ¿Por qué? Porque la elección no es libre, sino que viene forzada por la contradicción resultante de la anterior elección en el paso *n.* Además, se le pone subíndice *n*-1, para mostrar que fue necesario retroceder un paso. Dicho de otra forma, el nuevo paso resulta ser consecuencia del precedente a él, por lo que recibe el subíndice de éste.

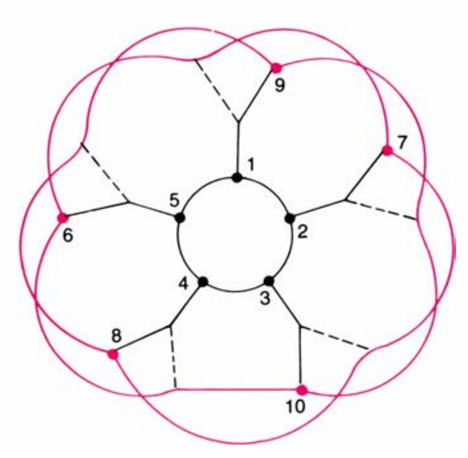
8. Se itera el procedimiento. Si el grafo es coloreable, se llegará finalmente a tricolorearlo. Si no lo es, se seguirá encontrando contradicciones que impondrán retrocesos. El número de subíndices irá disminuyendo para luego aumentar. Si, rotulados todos los bordes, ninguno de los rótulos lleva barra y todavía se tiene una contradicción, el grafo no es coloreable. Se ha encontrado un Snark.

"La tarea es tanto más sencilla", dice Isaac en una carta, "cuando más capaces seamos de prever las consecuencias de cada paso". Tras algún tiempo, al veterano cazador de Snarks se le ocurrirán numerosos atajos. Un dígono (un polígono de dos lados) de un camino puede despreciarse, pues, evidentemente, obliga a poner el mismo color antes y después de él. Análogamente, un triángulo puede considerarse como un vértice simple, pues los tres bordes que llegan hasta él han de tener tres colores distintos, como se puede demostrar fácilmente. Los cuadrados pueden simplificarse recordando que, o bien los cuatro bordes que conducen a él tienen el mismo color, o bien dos bordes adyacentes son de un color y, los otros dos, de otro. Los pentágonos se simplifican recordando que de los bordes a él concurrentes, tres adyacentes han de ser de un color, y los otros dos colores se encuentran en el par de bordes restantes.

Es conveniente, aconseja Isaac, buscar bifurcaciones del tipo representado en la última figura de la ilustración inferior izquierda de esta misma página. Si dos bordes como los marcados *"a"* son del mismo color, el señalado con la flecha ha de ser también del mismo color. Hallando elecciones obligadas como las anteriores pueden evitarse retrocesos innecesarios.

Todos los Snarks conocidos, nos dice Isaacs, contienen al menos un grafo de Petersen, lo que significa que suprimiendo ciertos bordes, y ciertos vértices de los bordes restantes, queda una estructura topológicamente idéntica al grafo de Petersen. En cambio, lo anterior no significa que el grafo de Petersen sea un subgrafo. Los subgrafos han de corresponder, punto por punto y borde por borde, a una porción del grafo. Aunque los subgrafos están contenidos en sus grafos, no todos los grafos contenidos en un determinado grafo son subgrafos de él. De hecho, el grafo de Petersen no puede ser subgrafo de ningún grafo trivalente, pues añadiendo un borde a uno de los vértices del grafo de Petersen se eleva el orden de los vértices a 4.

La figura superior de la página siguiente muestra cómo suprimir 5 bordes (trazados en línea de puntos) y 10 vértices del grafo "en flor" de la parte superior derecha de la figura de la página 104, a fin de obtener un grafo de Petersen. La numeración y el colorido están en correspondencia con los del grafo de la segunda ilustración de la parte inferior de



Snark en flor con su bañera

la página 103. La presencia de este grafo en el Snark prueba que éste no es planar, pues ningún grafo planar puede contener otro que no lo sea. Hay un famoso teorema que enuncia que todo grafo no planar (no necesariamente trivalente) ha de contener el grafo completo de cinco puntos, o bien otro, llamado de "servicios públicos", de seis puntos. En forma análoga, Tutte ha enunciado la conjetura de que todos los Snarks contienen grafos de Petersen. Si esta conjetura es cierta, el teorema de los cuatro colores es verdadero, y no existe ningún Boojum.

En nuestra terminología carrolliana, los grafos de Petersen son las "bañeras", que tanto aprecian los Snarks, y de las que Carroll dice que todo Snark

"... constantemente porta consigo,
convencido de que realzan la belleza
del paisaje.
Sentimiento del que no hay certeza."

Hallar bañeras en los Snarks no es siempre sencillo. Quizá valga la pena intentarlo en los otros dos Snark florescentes y en la estrella doble y embarcarse en una expedición a la cacería de Snarks por cuenta propia. Inténtelo dibujando y ensayando unos cuantos grafos trivalentes. Su capacidad para colorearlos mejorará rápidamente con la práctica, y sin duda quedará impresionado al comprobar cuán difícil es encontrar auténticos Snarks. Si en su zurrón trae alguno de más de 10 puntos (grafo de Petersen) y menos de 18 (grafos de Blanuša), me gustaría ver los dibujos. No se conocen Snarks de más de 10 vértices y de menos de 18. El primer Snark florescente no cuenta (12 vértices), pues el triángulo central lo convierte en variante trivial del grafo de Petersen.

¡Aguarde un instante! Acabo de trazar un grafo trivalente fantástico de 50 proyecciones que sobresalen como plumas. No tiene intersecciones. Muy bien podría ser un Boo...

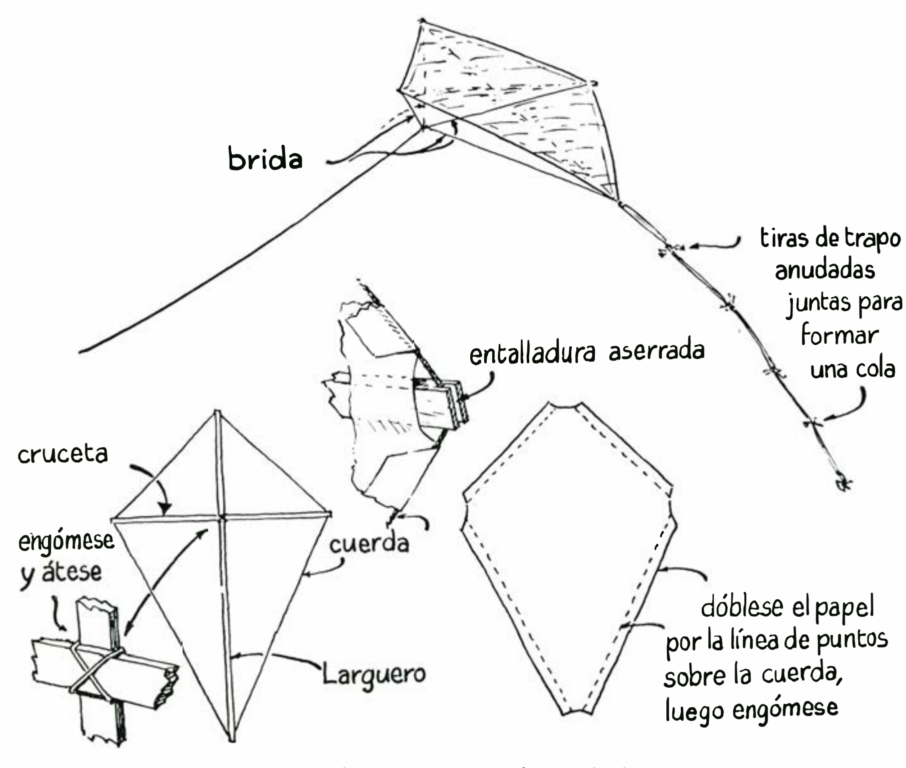
Taller y laboratorio

La ciencia y la aerodinámica de la fabricación y vuelo de las cometas

C. L. Stong

Hace algunos años, dos muchachos se ofrecieron a segarme el césped si yo les ayudaba a construir una cometa que volara. Acepté. La cometa que fabricamos funcionaba tan bién, que ampliamos el contrato a razón de cometa por siega y pasamos un verano memorable descubriendo las delicias del diseño, la construcción y el vuelo de las cometas. Aunque uno de los muchachos se convirtió con el tiempo en flamante ingeniero aeronáutico y el otro en bioquímico, su común entusiasmo por las cometas, así como el mío, continúa.

¿Qué es una buena cometa? La respuesta depende de los gustos e intereses de cada cual. Para los diestros entusiastas de Oriente, donde el deporte de lanzar cometas es anterior a los tiempos históricos, las cometas son de tres clases. La primera categoría comprende las cometas de combate. Un buen modelo resulta tan ágil y vigoroso que puede vencer a todos sus competidores en combate aéreo controlado. La segunda categoría comprende las cometas acrobáticas, que pueden volar en picado, rizar, dibujar un ocho, y así sucesivamente. Los diseños de la tercera categoría afectan primeramente a la sensibilidad del ojo y del oído. La forma de estas cometas va desde el simple contorno del diamante a figuras que representan pájaros, animales y otras figuras de la mitología, como los dragones, que llegan a medir hasta 30 metros de longitud. Las cometas suelen colorearse de forma graciosa, y pueden llevar tubos de bambú u otros instrumentos que emitan sonidos musicales.



Elementos de una cometa en forma de diamante

Las cometas que nosotros construíamos pertenecían a una cuarta categoría: la de las que alcanzan la mayor altura posible para una longitud dada de cuerda o, como diría un ingeniero aeronáutico, cometas cuya relación empuje-arrastre es máxima. Nos divertíamos ensayando nuevos diseños e imaginando misiones para las cometas; verbigracia: medir la temperatura del aire a varios miles de metros de altura y hacer fotografías aéreas. Obtuvimos gran parte de la información que necesitábamos de los archivos de la Oficina de Meteorología de los Estados Unidos, que hubo de utilizar ampliamente las cometas para levantar hasta la atmósfera los instrumentos meteorológicos antes de la aparición de las radiosondas, cohetes y satélites. A comienzos de siglo, la Oficina utilizaba 17 estaciones de cometas a lo largo del país y batió numerosas marcas. Por ejemplo, el 5 de mayo de 1910, la unidad más alta de un tren de 10 cometas de la Oficina de Meteorología transportó una carga de instrumentos meteorológicos a una altura de 7200 m. En conjunto las cometas del tren tenían una superficie de vela de 61,5 metros cuadrados y ejercían una tensión de más de 181 kilogramos fuerza sobre la cuerda de amarre de 14,5 km, hecha de cuerda de piano. El hilo fue largado y recogido mediante un tambor accionado eléctricamente.

Nuestros deseos eran mucho menos ambiciosos. Nuestra primera cometa era muy sencilla, en forma de diamante y compuesta de dos varas cruzadas, cubiertas con papel. Las longitudes del larguero, o vara vertical, y de la cruceta, o vara horizontal, eran de 0,91 y 0,61 metros de longitud, respectivamente. El punto medio de la cruceta cruzaba al larguero a una distancia de 0,3 metros del punto

más alto de éste. Unimos las varas en el punto de cruce con una gota de goma y una cuerda de apriete. Hicimos una entalladura visible de unos 16 mm de profundidad en los extremos de cada vara antes de montarlas (*véase la ilustración de la página anterior*).

Cuando la goma se había secado apretamos la cuerda que previamente habíamos pasado por las entalladuras y engomamos el papel que cubría las cuerdas. Montamos luego, en la cometa, una brida que consistía en un lazo de cuerda atada a los extremos superior e inferior del larguero situados en el lado empapelado de la cometa y en otro lazo a lo largo de la cruceta. La longitud de la brida se ajustó de tal forma que la cuerda quedase tensa cuando los lazos se alejasen 30 cm del papel, hasta un punto colocado sobre la perpendicular de la cruz. La cuerda de amarre se ató provisionalmente a la brida en este punto. El punto en el que la cuerda se unió a la brida determinaba el ángulo con el que el aire golpeaba a la cometa, es decir, el ángulo de ataque.

Las cometas, como el palo mayor de un velero, funcionan mejor con ángulos de ataque comprendidos entre 20º y 25º. A causa de la pronunciada curvatura del papel, este ángulo es mayor que aquel otro con el que el ala de un avión ataca el viento. El ángulo exacto de ataque con el que una cometa funciona mejor depende de la fuerza del viento y debe determinarse experimentalmente. En general, el ángulo debe decrecer cuando crece la velocidad del viento. El cambio se realiza desplazando la cuerda de amarre hacia la parte superior de la cometa.

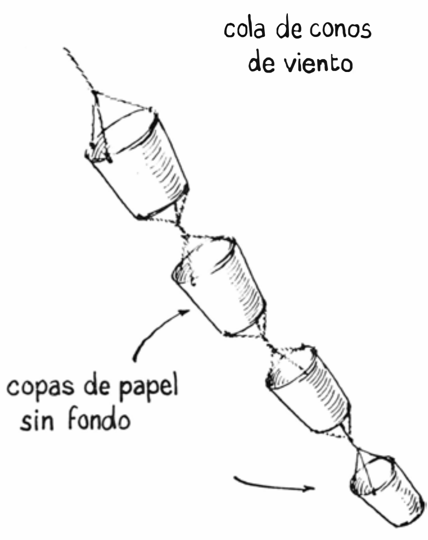
Las cometas con forma de diamante son intrínsecamente inestables, por lo que se les debe acoplar una cola para mantenerlas derechas. El peso de la cola presta parte de la fuerza de estabilización: otra parte, la fricción entre la cola y el aire en movimiento y, otra tercera parte, la turbulencia generada en la corriente de aire por la cola. Las últimas dos fuerzas se denominan de arrastre. Para que la cometa pueda volar, las fuerzas con sentido descendente deben ser inferiores al empuje que desarrolla el flujo de aire, bajo y sobre la cubierta de papel. La cola proporciona estabilidad, si bien a costa del empuje. Las necesidades de estabilidad aumentan con la velocidad del viento. Una cometa que vuele plácidamente con una cola corta en una brisa ligera girará sin control en un viento fuerte. Incluso una cometa con una cola larga y que vuele bien en un viento fuerte puede no volar en una brisa ligera.

Una solución para este problema es dotar a la cometa de una cola consistente en una serie de conos de viento (*véase la ilustración de esta página*). Estos conos puede fabricarse quitándole el fondo a ciertos recipientes de papel, como las copas o los cartuchos de un helado. La fuerza desarrollada por el aire que fluye a través de los conos aumenta con la velocidad del viento y proporciona una estabilidad óptima dentro de un amplio intervalo de velocidades del viento. Las cometas con largas colas de esta clase vuelan considerablemente más alto que las que poseen colas hechas de tiras de tela o papel atadas a intervalos a lo largo de la cuerda.

La forma de la cometa de diamante puede modificarse fácilmente. Por ejemplo, tres varas de la misma longitud pueden cruzarse para formar un hexágono. Otra, de forma circular, puede obtenerse doblando el bambú en círculo. Pueden hacerse combinaciones de varas rectas y de bambú para obtener figuras de pájaros. Todas estas formas vuelan casi con idéntica perfección si se las equipa con una cola de estabilización apropiada. En Oriente, a menudo se realizan diseños complejos, apilando cometas unas detrás y muy cerca de otras. Las cometas se atan entre sí por cuerdas que unen los ángulos de una cometa a los ángulos comparables de las que le suceden. La brida se monta en la primera cometa de la serie. Los miembros sucesivos de la serie funcionan, a la vez, como cometas y como cola de estabilización.

Para lanzar una cometa de cualquier clase, se coge la cuerda de amarre con una mano y el extremo inferior de la cometa en la otra. Se inclina la cometa de manera que forme un ángulo de unos 25º con el viento, con el lado empapelado enfrentando a éste, y se suelta. A medida que la cometa se vaya elevando, se libera la cuerda de amarre a una velocidad que permita a la cometa mantener su ascenso. Si son dos las personas que tratan de hacerla volar, una deberá sostener la cometa mientras que la otra tendrá que soltar un metro y medio de cuerda. Cuando la cuerda se tense suficientemente se lanzará, inclinada, al aire.

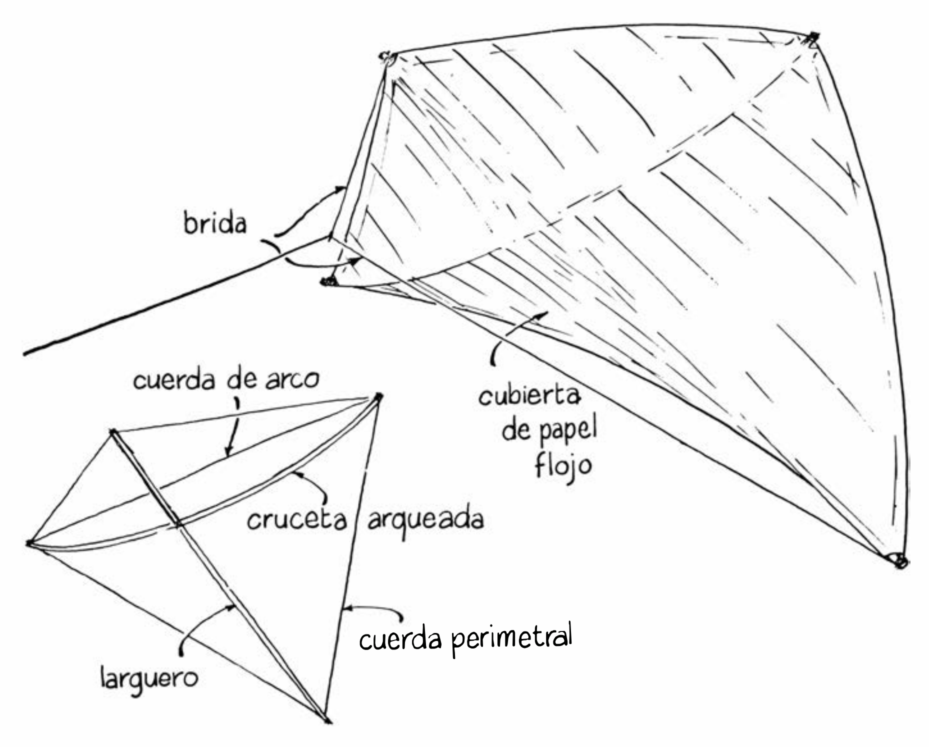
Los materiales para fabricar una cometa se obtienen fácilmente, Nuestras varas procedían principalmente de un almacén local de maderas. Seleccionábamos abeto de fibra recta, sin nudos, de 1,91 cm de espesor, 15,24 cm de ancho y 1,83 metros de largo: lo pedíamos cortado en tiras de 4,76 mm a 6,36 mm de ancho. También hacíamos armazones de cometas partiendo de las existencias de pasadores de madera de 6,35 mm de diámetro. Estos pasadores son más pesados que el abeto, se doblan con mayor facilidad y cuesta más unirlos que las varas planas, pero, en cambio, se encuentran ya fabricados en muchos establecimientos de ferretería.



Cola de conos de viento

Usábamos cuerdas de amarre de nylón. La tensión de rotura del nylón es mayor, en proporción a su peso y espesor, y produce menos arrastre en el viento que otras cuerdas que probamos, particularmente la cuerda peluda de algodón conocida como cuerda de carnicero. No se debe usar, como cuerda de arrastre, cuerdas de piano o cualquier otro material que sea conductor de electricidad. Algunos lanzadores de cometas cayeron electrocutados por "cuerdas" conductoras de electricidad, que entraron accidentalmente en contacto con líneas de alta tensión. No hay que lanzar nunca una cometa con una cuerda mojada, ni intentar reproducir el experimento de Benjamín Franklin de atraer el "fuego eléctrico" de una tormenta. Franklin tuvo suerte. A un científico europeo, que siguió sus instrucciones para llevar a cabo el experimento, lo mató un rayo que descendió por la cuerda húmeda.

Las cometas de hasta 1,20 metros de diámetro pueden cubrirse con el mismo papel de periódico. La seda ligera, tejida tupidamente, es mejor, más fuerte y desarrolla menos arrastre, pero resulta más cara.



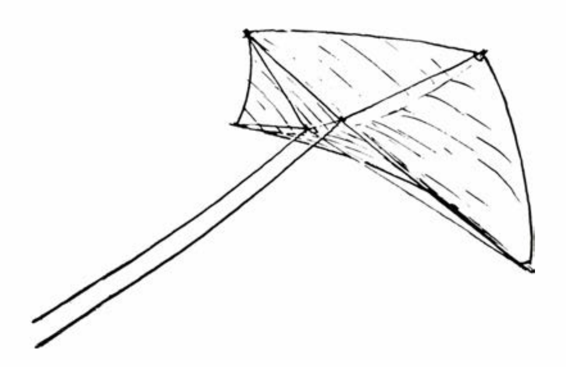
Configuración de una cometa malaya

El material más fuerte y de más rendimiento aerodinámico son las hojas de plástico resistentes; como las que emplean los agricultores para proteger el grano y la paja de la intemperie.

En seguida nos decidimos a fabricar y lanzar cometas malayas. Son, básicamente, cometas con forma de diamante que se estabilizan por su forma y, por tanto, no necesitan cola. Vuelan mucho más alto que las cometas con cola y son fácilmente manejables. La estabilidad se consigue doblando la cruceta hacia atrás con una cuerda de arco (*véase la ilustración superior*). La estabilidad aumenta con la profundidad del arco. En el caso de una cruceta de 60 cm de longitud, el arco tiene una profundidad típica de unos 10 cm. Cuando la cometa afronta perpendicularmente al viento, la fuerza de éste actúa de la misma manera sobre los lados derecho e izquierdo de la superficie. Las fuerzas se desequilibran cuando un soplo de viento gira la cometa de tal forma que un lado presenta al viento más superficie que el otro. El lado que mira al viento sufre una fuerza mayor que hace girar la cometa hasta restablecer el equilibrio. Las alas de los aviones se unen de forma similar para formar una ligera V, conocida como ángulo diedro, que proporciona estabilidad lateral. También en este caso se gana estabilidad a costa del impulso. Las cometas malayas de arco mínimo vuelan más altas que las de arco máximo, pero tienden a picar hacia atrás y hacia adelante, a rizar y girar. Las cometas de máximo arco vuelan con estabilidad, aunque a menor altura. El papel que cubre estas cometas debe estar distendido, como las velas de los barcos, de forma que el viento pueda doblar su superficie hasta constituir una curva uniforme. Una cometa malaya lleva una brida de una sola cuerda, que tiene que atarse al larguero.

Dotando a la cometa malaya de dos o más cuerdas de amarre y una brida cruzada, la forma de vuelo puede controlarse desde el suelo. A las partes superior e inferior del larguero se atan dos bridas de igual longitud, y una tercera cuerda se ata a los extremos de la cruceta. Las cuerdas verticales se separan a izquierda y derecha y se atan simétricamente a la cuerda horizontal (*véase la ilustración inferior de la izquierda*). Las cuerdas de amarre se unen a los puntos de cruce de la cuerda horizontal y de la vertical de la brida. Durante el vuelo, la cometa derivará oblicuamente hacia la cuerda más tensa a una velocidad creciente con la intensidad de dicha tensión. En el límite de su deriva lateral, la cometa dará la vuelta, picará e invertirá su dirección lateral. La maniobra hará que se enrosquen las dos cuerdas de amarre. Pueden desenroscarse tirando de la cuerda floja, lo que hará que la cometa repita la misma maniobra al revés. El arte de hacer efectuar a la cometa otros vuelos acrobáticos puede aprenderse con la práctica.

Para levantar una carga (un termómetro, un barómetro o una cámara) preferimos una cometa francesa de guerra, que es una cometa en forma de caja triangular con un par de alas triangulares (*véase la ilustración de la parte superior de la página opuesta*). La estructura se compone de cinco varas. En un diseño de tamaño modesto, cuatro de ellas pueden medir 914 mm de longitud y, la quinta, 355 mm. Dos de las varas largas se emplean como largueros verticales, separados 30 cm. La cruceta atraviesa los largueros a una distancia de 30 cm, medidos desde la parte superior de éstos. La vara corta se coloca paralela a la cruceta y a 30 cm por debajo de ella. Todos los cruces se pegan y atan con una cuerda. La estruc-

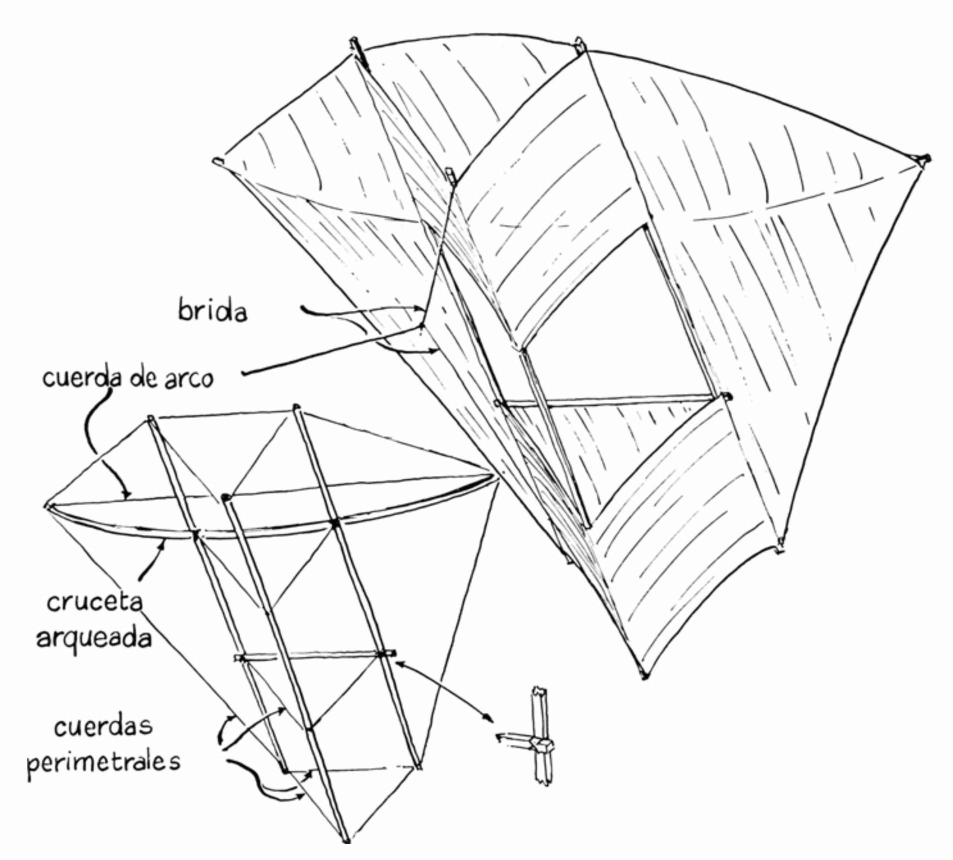


Control de una cometa malaya

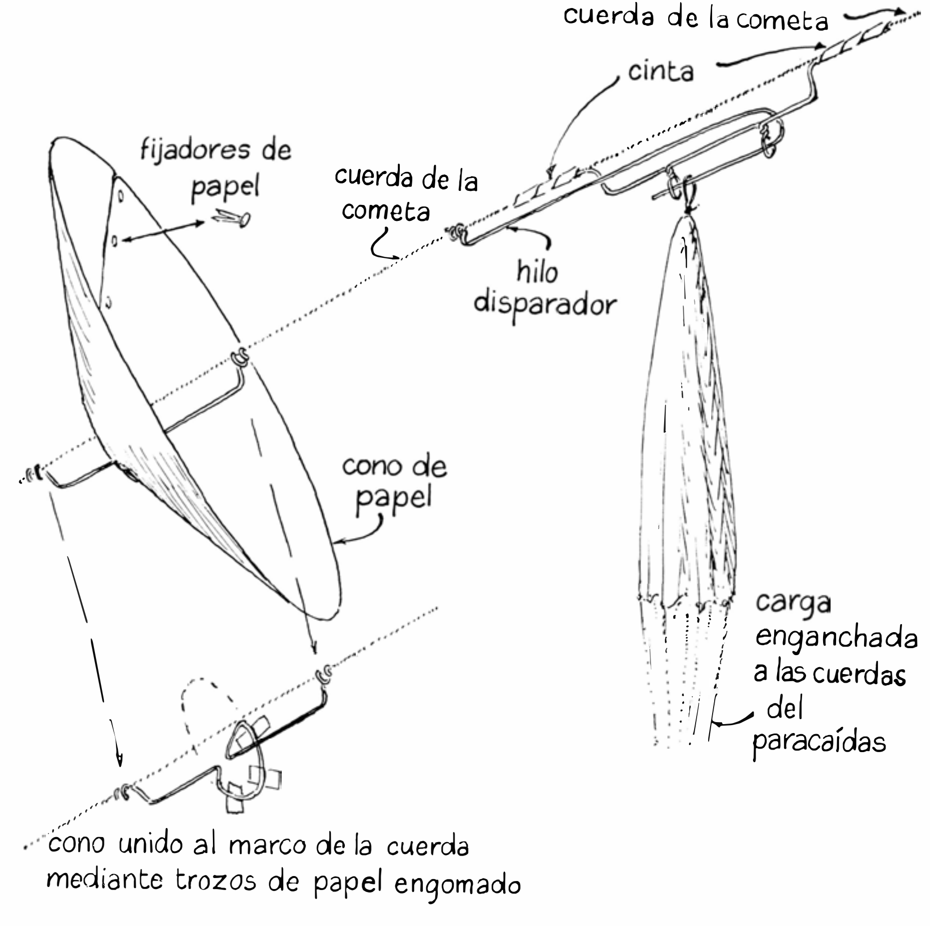
tura completa se cubre con papel, como se hacía en el caso de la cometa hexagonal. Después se corta diagonalmente el cuadrado de papel situado en el centro y limitado por los largueros, la cruceta y la vara corta. Las faldillas de papel resultantes se pliegan sobre las maderas adyacentes y se pegan en el lugar sobre el que se abaten. La estructura es ahora la de una cometa hexagonal con un hueco cuadrado en el centro. La sección de caja triangular se hace dotando a los bordes de dos cintas de papel, provistas de cuerdas perimetrales. Se introducen parcialmente cuatro clavos en la mesa de un banco de trabajo, de modo que delimiten un rectángulo de 30 cm de ancho y 90 cm de largo. Se pasa y se tensa una cuerda perimetral en torno a los cuatro clavos y se atan los extremos entre sí. Se cortan dos tiras de papel de 35,5 cm de ancho y 66 cm de largo. Se desliza una de las tiras bajo el lazo rectangular formado por esta cuerda perimetral y se centra en relación con los clavos. Se dobla 2,5 cm de papel sobre la cuerda, a los lados, y se pegan sobre ese lugar. Se corta el largo de cuerda en los extremos a mitad de camino entre los clavos. Los lados de la tira de papel quedan ahora reforzados con las cuerdas, cuyos extremos se extienden desde los cuatro ángulos de la tira.

Se cortan 2,5 cm de papel, próximo a la cuerda, en los cuatro ángulos y se dobla el extremo hacia arriba en faldillas de 2,5 cm. Se prepara la segunda tira del mismo modo. Para montar las tiras sobre el cuerpo de la cometa, se abren cuatro pequeños agujeros en el papel del cuerpo en el extremo exterior de los largueros y donde éstos cortan a la cruceta y a la vara corta. Se pasan las cuerdas de la tira de papel a través de los huecos y se las ata fuertemente a los largueros. Hay que pegar luego las faldillas de 2,5 cm de las tiras al cuerpo de la cubierta. Finalmente, se desliza el larguero restante dentro de las bandas de papel; se centra y se pega a las tiras de papel. El centrado resulta fácil si las tiras de papel han sido marcadas con un pliegue en ángulo recto en su mitad. La cometa puede suspenderse boca abajo por cuerdas unidas a los extremos del larguero central, mientras se seca la goma.

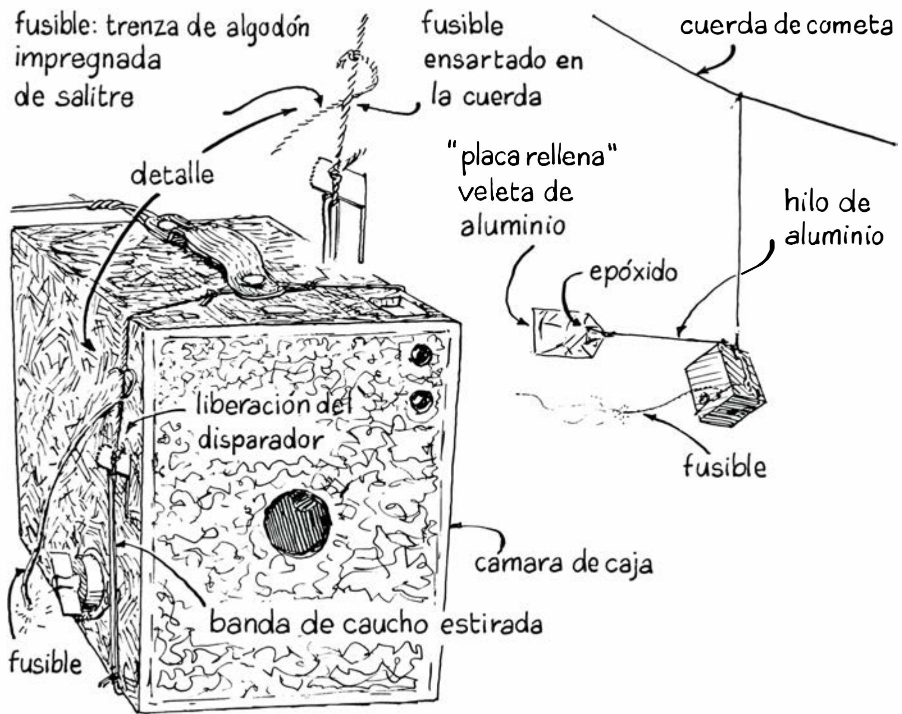
Inmediatamente antes de lanzar la cometa, la cruceta se arquea y se sujeta en esta posición con una cuerda de arco, como se hacía en el caso de la cometa malaya. La brida se une al centro del larguero de la sección triangular. Cuando una cometa francesa de guerra de estas dimensiones se lanza, con un viento de 24 kiló-



Cometa francesa de guerra



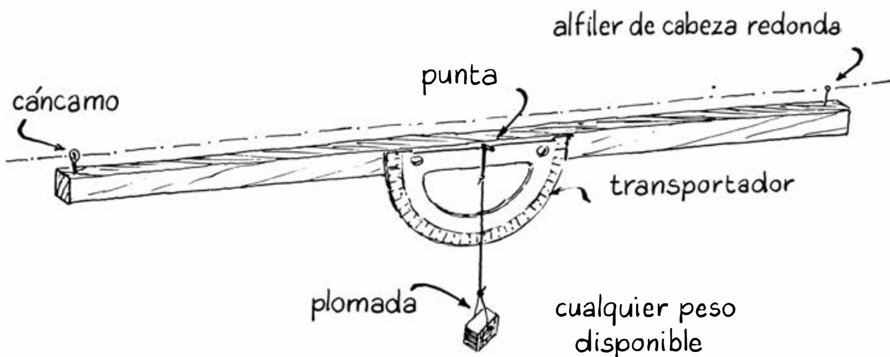
Mecanismo para soltar una carga



Fusible para liberar el disparador de la cámara

metros por hora, puede elevar una carga de unos 57 gramos por cada 9 dm² de área de vela y ejercer, en la cuerda de amarre, una tensión de unos 50 gramos por decímetro cuadrado.

La intensidad del empuje que desarrolla una cometa en relación a la fuerza de arrastre que tiende a empujarla hacia abajo en la corriente de viento –la relación empuje-arrastre– aumenta dentro de ciertos límites, ya que la anchura de la cometa aumenta en relación a su longitud, proporción que se conoce con el nombre de factor de forma. El factor de forma de las alas de un avión suele ser de 7 a 1; las alas son largas y estrechas. La cometa de guerra francesa puede considerarse como una cometa en forma de caja triangular con alas triangulares, con un factor de forma comparativamente bajo. El factor de forma puede aumentarse empleando una cruceta de mayor longitud que los largueros. Ello mejora la relación empuje-arrastre. La modificación, si se lleva al extremo, da lugar a inestabilidad y a debilidad estructural, a no ser que la cruceta se haga en forma de entramado. Nos divertíamos mucho construyendo cometas de variadas proporciones y observando su funcionamiento. Para alcanzar la altura máxima, lanzábamos la cometa y largábamos tanta cuerda de amarre cuanta pudiera soportar. Cuando aparecía una comba pronunciada en la cuerda de amarre, atábamos una segunda cometa y la dejábamos ascender hasta que la cuerda de amarre quedase floja de nuevo. Una tercera cometa se ataba luego, y así sucesivamente. El número de cometas que pueden formar el tren queda limitado solamente por la resistencia de la cuerda de amarre. Ocasionalmente, la cometa superior del tren puede quedar atrapada en una corriente ascendente y empujada dentro de un viento que sople en una dirección que difiera del viento de la superficie. El tren completo es transportado, entonces, hacia arriba. En una ocasión, la cometa más alta de uno de nuestros trenes alcanzó una altitud superior a los 1600 metros. La cuerda se movió en espiral hacia abajo, de manera que la cometa superior estaba directamente sobre nuestras cabezas y permaneció allí alrededor de una hora.



Instrumento para medir ángulos

Adaptamos a las cometas diversas cargas que podían dejarse caer en paracaídas o ser manipuladas de otro modo. Por ejemplo, puede atarse a la cometa un paracaídas con un sencillo gancho de alambre que tiene una prolongación que sirve como disparador de la carga. El disparador puede hacerse funcionar desde tierra colocando un cono de papel, llamado mensajero, alrededor de la cuerda de amarre y dejando que el viento lo eleve hasta la cometa, donde accionará el disparador y liberará el gancho *(véase la ilustración inferior de la página anterior).*

También se puede liberar cargas y operar obturadores de cámaras por medio de un fusible. Para preparar el fusible hay que mojar una trenza de hilo de algodón ordinario en una disolución saturada de salitre (nitrato potásico) en agua. Déjese secar la cuerda. Cuando ésta se quema, arde sin llama a una velocidad de unos 7,6 centímetros por minuto.

Para hacer una fotografía con esta técnica, se debe atar el disparador de la cámara en su posición de cerrado con un trozo de fusible corto. Se estira una goma de caucho sobre el disparador desde la posición opuesta, de forma que ejerza una fuerza en dirección contraria. Se sujeta el extremo libre dé la goma elástica a un punto conveniente del cuerpo de la cámara.

Se corta la longitud del fusible adecuada al intervalo de tiempo deseado. Si se desea que el disparo se produzca a los 10 minutos conviene hacer un fusible de 81 cm de longitud. Se pasan 2 cm de esta longitud a través del fusible, que ata al disparador y queda asegurado con un nudo *(véase la ilustración de la parte superior de esta misma página).* El disparador funcionará diez minutos después de que se encienda el extremo libre del fusible de 81 cm. La cámara puede mantenerse mirando a cualquier dirección, acoplándole una veleta.

El ángulo con el que la cometa ataca el viento puede abrirse más o cerrarse durante el vuelo, insertando en la brida un lazo de cuerda que se mantenga cerrado mediante un gancho disparador o un fusible. Cuando el lazo se suelta, se abre, aumentándose así la longitud de la brida y alterando, por lo tanto, el ángulo

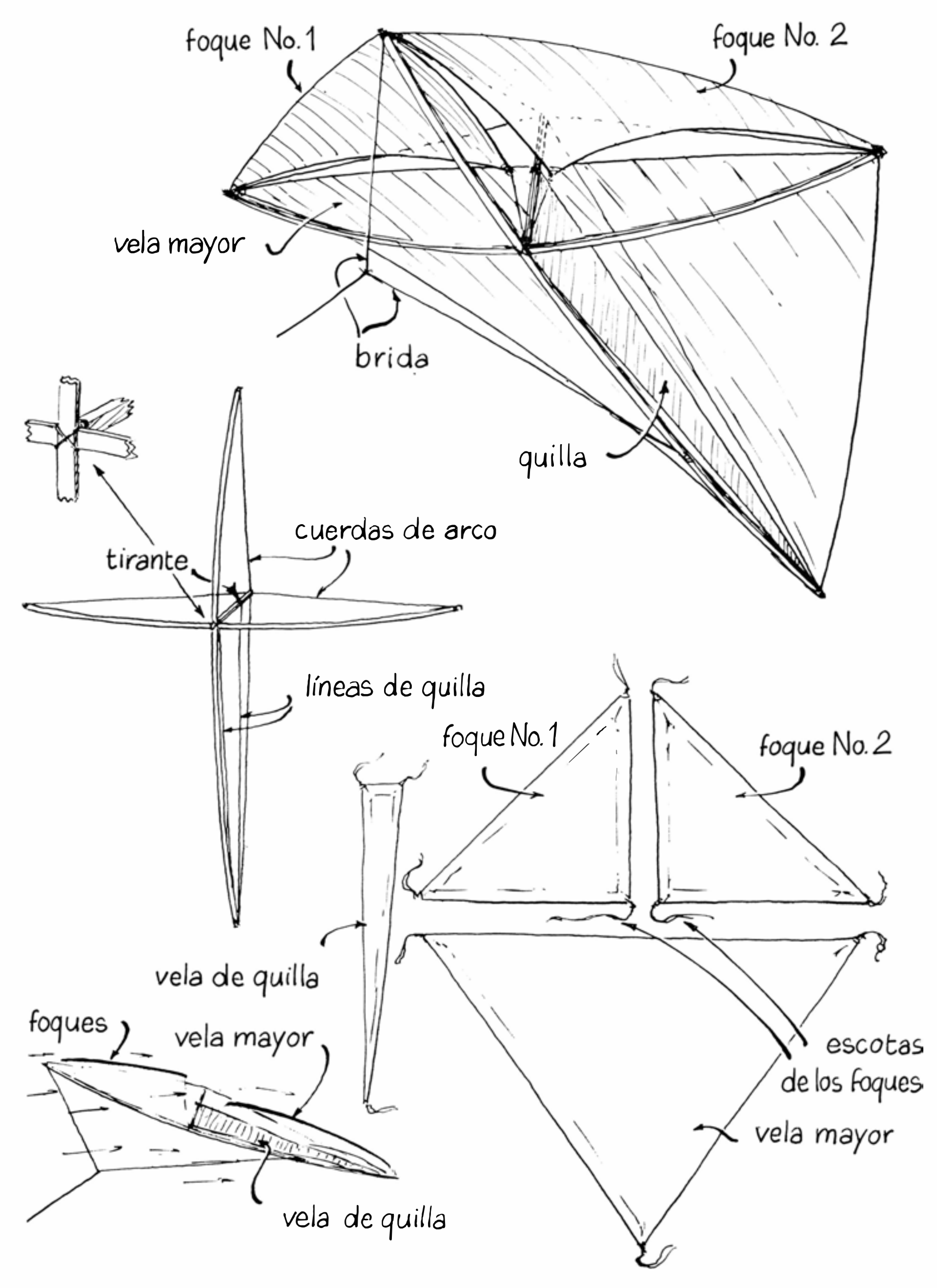
de ataque. El lanzador de cometas moderno puede llevar a cabo estas y otras operaciones por radiocontrol. Pueden construirse receptores de radio versátiles, con transistores, que pesen menos de 30 gramos y sean capaces de secundar un conjunto notable de órdenes.

La altura aproximada de una cometa sobre tierra puede determinarse multiplicando la longitud de la cuerda de amarre por el seno trigonométrico del ángulo comprendido entre la cometa, el extremo de la cuerda y el punto situado directamente debajo de la cometa. Nosotros marcábamos la cuerda con pintura de color a intervalos de 30 metros: rojo, amarillo, azul, verde y negro, a lo largo de los primeros 150 metros; luego rojo-rojo, rojo-amarillo, rojo-azul, y así sucesivamente durante los 150 metros siguientes. Después, utilizábamos combinaciones de tres colores, cuatro colores, y así sucesivamente. Para medir el ángulo, atábamos un transportador y una plomada a una vara con un par de visores sobre ella *(véase la ilustración inferior de la página precedente).* Para corregir el error de la comba de la cuerda de amarre se multiplica la altura por 0,96. Por ejemplo, ¿qué altura tiene una cometa que vuele con un ángulo de 30 grados, con una cuerda de 150 metros? El seno de 30 grados es 0,5, y 150 veces 0,5 por 0,96 son 72 metros.

Las características aerodinámicas de las cometas invitan a la innovación. Hicimos varios diseños, uno de los cuales nos reportó grandes satisfacciones, hasta que supimos que había sido ensayado, por distintos autores, varias veces. Se nos ocurrió que el empuje de una cometa podría ser mejorado utilizando un truco de los diseñadores de balandros de competición. Estos barcos tienen un foque y una vela mayor. Desde un punto de vista aerodinámico, el foque importa poco en el movimiento hacia adelante del barco; si se dirige una corriente de aire en el ángulo apropiado detrás de la vela mayor, el foque aumenta la efectividad de ésta en unas tres veces, de acuerdo con el proyectista alemán de yates Manfred Curry. El "ala plegada" de los aviones de alto empuje es otra aplicación del principio del foque. ¿Por qué no adaptar a la cometa un par de foques? Decidimos hacerlo así.

La estructura de la cometa con foques se parece a la de la cometa malaya. Consiste en un larguero y una cruceta perpendiculares. Un tirante se extiende verticalmente desde la cruz a sotavento y se une al extremo exterior por un par de cuerdas de arco atadas al larguero y a la cruceta. Las velas se hacen de nylón delgado, tejido tupidamente. Una vela triangular, que semeje una banderola, se ata entre el tirante y el extremo inferior del larguero (*veáse la ilustración superior*). La vela mayor triangular se ata a los extremos de la cruceta y al extremo inferior del larguero, y se curva sobre la quilla. Se atan dos ángulos de cada foque a los extremos de la cruceta y a la parte superior del larguero. El tercer ángulo de cada foque se ata sin tensión a la cruz de la estructura. Los foques se ajustan de tal manera que el aire fluya sobre las superficies más bajas de los mismos y pase sobre el borde de ataque de la vela mayor. Como en el caso de un barco de vela, el ajuste óptimo de los foques varía con la fuerza del viento y debe ensayarse su modificación a fin de lograr el máximo empuje. La cometa parece desarrollar unas dos veces el empuje de una cometa francesa de guerra para velocidades del viento de hasta 19,2 km por hora. Habíamos programado hacer una serie de ensayos de la cometa de foques en el túnel estuviera acabado y mis colaboradores volvieran a la escuela.

Una advertencia prudente: póngase siempre guantes de piel cuando sujete la cuerda de una cometa, en particular si utiliza el nylón. Una cuerda en movimiento le puede quemar y cortar la mano. Nunca haga volar una cometa sobre una multitud o con una cuerda de más de 30 metros cuando esté a menos de 1660 metros de un aeropuerto.



Cometa de foques

Libros

El análisis experimental de la conducta y el conductismo radical como filosofía

Angel Rivière

SOBRE EL CONDUCTISMO, B. F. Skinner; trad. de Fernando Barrera. Editorial Fontanella, Barcelona, 1975. En el proceso de condicionamiento operante se modifica la probabilidad de las respuestas en función de las contingencias de refuerzo: cuando la respuesta tiene como consecuencia un refuerzo positivo, su probabilidad aumenta; si se castiga o se refuerza negativamente, disminuye. El estudio de las relaciones funcionales entre los programas de refuerzo y las tasas de respuesta se debe, sobre todo, a B. F. Skinner, uno de los creadores más fecundos, polémicos e influyentes de la psicología norteamericana de los últimos cuarenta años.

Pero parece como si el propio Skinner, con su conducta, refutase esta ley fundamental del condicionamiento operante porque, si pensamos, con Watson, que el "escribir libros" constituye una clase de respuestas, y consideramos como subclase de ella la de "escribir libros metaempíricos", entonces tendremos que convenir en cuán extraño resulta que, en virtud del citado principio, no haya disminuido hasta cero la probabilidad de que Skinner emita tales respuestas. Sin duda, han sido duramente castigadas, rodeadas de las contingencias más aversas; los libros metaempíricos de Skinner, como *Walden dos* o *Más allá de la libertad y de la dignidad* (y hasta otros más empíricos como *Verbal Behavior*) han provocado la réplica indignada de parte de la comunidad científica y algunas de las polémicas más sonadas y agrias de la historia reciente de las ciencias del comportamiento (ejemplo paradigmático es la recensión que hizo Chomsky, en 1959, de *Verbal Behavior*). Pero las contingencias aversivas no han producido la extinción, en el silencio, de la conducta del autor.

La aportación empírica de Skinner al estudio del aprendizaje es indiscutible. El carácter polémico de su obra se debe, más que a cualquier otra cosa, a una peculiar visión de lo que es y debe ser la ciencia, el hombre y la sociedad, a una "filosofía de la ciencia" que se bosqueja, a grandes pinceladas, en *Sobre el conductismo.* La obra merece, sin duda, un análisis detallado: en (I) se resumen brevemente los aspectos esenciales del contenido del libro, en (II) y (III) se examinan críticamente sus proposiciones básicas.

(I). Ante todo, Skinner comienza por deshacer un malentendido: "el conductismo –dice– no es la ciencia del comportamiento humano. Es la filosofía de esa ciencia". Y nos propone una versión muy definida de tal filosofía, el denominado "conductismo radical", advirtiendo honestamente que "el lector debe saber que no todos los conductistas estarán de acuerdo con lo que... diga", y que su postura es "reconocidamente una versión personal"

A diferencia de otras versiones del conductismo, como el llamado "conductismo metodológico", el conductismo radical no niega la posibilidad de la autoobservación o el autoconocimiento, "no decapita al organismo de esa manera", aunque mantiene sus reservas con respecto a la validez científica de la introspección. La razón de las reservas reside en los graves problemas metodológicos que presenta la observación introspectiva, pues la comunidad carece de la información necesaria para enseñar al individuo a discriminar los estados de su propio cuerpo, que son los referentes de la introspección.

Sin embargo, no es la falta de fiabilidad de la introspección el factor fundamental que exige eliminar sus referentes al explicar la conducta, sino el hecho de que tales referentes *no* son las auténticas causas del comportamiento, aunque lo parezcan de un modo inmediato. Así, los sentimientos, por ejemplo, "son simplemente productos colaterales de las condiciones responsables del comportamiento" y "el cambio en los sentimientos y el cambio en el comportamiento tienen una causa común". La causa común es el conjunto de contingencias de supervivencia y de refuerzo a que están expuestos los organismos. Por ello, puede abandonarse el segundo eslabón *(Ciencia y conducta humana)* de la cadena causal "ambiente-condición interna-conducta", dado que "nuestro conocimiento creciente del control ejercido por el ambiente hace posible examinar el efecto de lo que hay "bajo la piel". También hace posible la interpretación de una amplia gama de expresiones mentalistas".

En esta interpretación o "traducción a comportamiento" de los enunciados mentales reside, creemos, el núcleo fundamental del conductismo radical y la finalidad primaria del libro de Skinner, la mayor parte del cual se dedica a recoger los resultados de la disección del afilado bisturí del conductista radical sobre los términos mentales: de ellos, alguno –el de instinto– puede reducirse a las contingencias de supervivencia que produjeron la evolución de las especies, otros pueden verterse al lenguaje del condicionamiento "respondente" –condicionamiento clásico de Pavlov–, pues "el reflejo condicionado es un principio simple, de alcance limitado, mas para explicarlo se han inventado muchos estados y actividades internas"; los más son susceptibles de traducción al limitado vocabulario del condicionamiento operante.

Como resultado de esta traducción, "el conductismo pide el cambio probablemente más drástico jamás planteado en nuestro modo de pensar acerca del hombre": reconocer que nuestros quereres, necesidades, deseos y anhelos no son más que "términos mentalistas (que) se refieren a las condiciones que afectan tanto a la susceptibilidad de refuerzo como a la fortaleza del comportamiento ya reforzado"; ver cómo la voluntad libre se volatiliza, pues "la condición crítica para el ejercicio del libre albedrío es el refuerzo positivo", con lo cual "la persona no es un agente generador, es un *locus,* un punto en el cual confluyen muchas condiciones genéticas y ambientales en un efecto común"; suponer que, de la personalidad, sólo queda "en el mejor de los casos... un repertorio de comportamientos proporcionado por un repertorio organizado de contingencias"

(140); asimilar que los procesos "mentales superiores" de percepción, pensamiento y lenguaje deben, también, "sacarse del interior", reducirse a las contingencias ambientales que la sociedad dispone para el individuo.

En definitiva, el análisis "operante" de los términos fundamentales del arsenal mentalista permite reconocer, junto con la importancia del control ambiental, la inutilidad de las causas internas. La supervivencia de la cultura y del hombre nos exige que sustituyamos nuestros vagos conceptos mentalistas, como "libertad", "moralidad", "dignidad", por un control racional del medio: hay que pasar de la difusa "concienciación" mentalista a la precisa "contingentación" conductista.

(II). Este bosquejo telegráfico sirve para poner de manifiesto la amplitud de temas e intereses que abarca la filosofía de la ciencia de Skinner. En realidad, deberíamos hablar no ya de una concepción de la ciencia, sino también del hombre y de la sociedad, indisolublemente mezclada con ella, y que se encuentra esparcida en gran parte de una obra (p. e. en SKINNER, *The Behavior of Organisms, Cumulative Record, Behaviorism at fifty*) a la que tendrá que acudir todo aquel que quiera esclarecer los no pocos puntos oscuros y confusos que aparecen en *Sobre el conductismo*. Pero en estas páginas nos fijaremos, sobre todo, en los aspectos más directamente relacionados con la filosofía de la ciencia propiamente dicha, y ello por tres razones: porque es el tema explícito del libro, porque ha sido uno de los menos analizados y porque constituye –como veremos– la raíz de la especulación acerca del hombre, de la sociedad y de sus males y remedios.

Desde ese punto de vista, el conductismo radical se define por varias prescripciones metodológicas y por un postulado epistemológico fundamental. Estos dos aspectos son, como veremos, totalmente interdependientes. En el primero de ellos, Skinner viene aconsejando a los psicólogos ciertas precauciones metódicas desde la publicación de *The Behavior of Organisms* en 1938: la teoría psicológica debe ser objetiva, descriptiva y positivista, formular inductivamente leyes cuantitativas, evitar la deducción formal, la fisiologización prematura, el empleo de hipótesis, las concepciones de sentido común, etc.

En el segundo aspecto, el postulado epistemológico fundamental de cualquier conductismo es la proposición de que existe necesariamente una conexión lógica entre los predicados mentales y las descripciones del comportamiento (FODOR, *Psychological Explanation).* En el caso del conductismo radical, esa exigencia de conexión lógica se interpreta en el sentido de que las adscripciones mentales deben ser *definibles* en términos de predicados comportamentales o, parafraseando a Skinner, en el sentido de que "algunos (de esos términos mentales) pueden traducirse por comportamiento, otros se pueden descartar como innecesarios o inútiles". En este contexto, podemos hablar de la existencia de un "reduccionismo de contenido" en la obra de Skinner, ya que, como señalábamos en (I), el núcleo del conductismo radical consiste en la reducción fisicalista de los fenómenos mentales, bien que –a diferencia del Carnap de 1932–, Skinner proponga una traducción ambiental, "externa a la piel", y no fisiológica.

El mecanismo fundamental de cualquier reduccionismo de contenido es el empleo de supuestas relaciones analógicas entre el comportamiento que se trata de explicar (por ejemplo, la solución de problemas) y el que ya está explicado (por ejemplo, el condicionamiento operante). El resultado es que determinados aspectos específicos o ciertas capacidades concretas del sujeto se toman como dominio inicial de investigación y como base suficiente para formular una explicación de todo el comportamiento; éste ha sido, como ha demostrado Rappaport, el origen de los grandes sistemas de psicología que se desarrollaron entre las dos guerras mundiales y, en este sentido, el conductismo radical constituye un resto de la etapa de los macrosistemas.

¿Hasta qué punto es justa la acusación de reduccionismo contra Skinner? Debemos oír, ante todo, la defensa del autor: "se ha dicho que la ciencia del comportamiento deshumaniza al hombre porque es reduccionista, se dice que maneja una clase de hechos como si fuera otra clase.... Pero el conductismo no pasa de un sistema dimensional a otro. No *reduce* los sentimientos a estados corporales; simplemente afirma que lo que se siente son, y siempre han sido, estados corporales. No *reduce* a comportamiento los procesos de pensamiento, simplemente analiza el comportamiento que antes se explicaba con la invención de procesos de pensamiento. No reduce la moralidad a ciertos rasgos del ambiente, simplemente insiste en que esos rasgos siempre han sido los responsables del comportamiento moral". Ciertamente, los términos "reducir", "reduccionista" y "reductivo" han adquirido un matiz peyorativo en psicología; y, si el conductismo nos demuestra que los sentimientos son estados corporales, no tendremos derecho a formular la acusación de reduccionismo, sino el deber de reconocer que, por fin, se ha encontrado una explicación adecuada de tan complejos fenómenos.

Pero esto es desenfocar el problema, porque lo recusable no es, en absoluto, el reduccionismo de contenido, sino, más bien, el modo de llegar a él, lo que podríamos llamar "reduccionismo de método", mecanismo por el cual las consideraciones de estrategia científica se trastrocan en enunciados causales, y éstos se convierten en juicios de valor social. Tomemos, como ejemplo, la siguiente afirmación estremecedora: "Nadie camina fuera de la corriente causal. Nadie interviene realmente. La humanidad ha creado, lenta pero erráticamente, ambientes en los cuales las personas se comportan más efectivamente y, sin duda, disfrutan de los sentimientos que acompañan al comportamiento que ha tenido éxito. Este es un proceso continuo". Este enunciado que nos habla de un omnipotente Ambiente Absoluto, espejo cóncavo del Espíritu de Hegel, tiene su origen –aunque parezca mentira– en humildes consideraciones de estrategia científica: que conviene analizar las relaciones entre las variables de entrada y las de salida, reducir al mínimo o a la nada los términos teóricos, prescindir provisionalmente de la teoría del aprendizaje, mantenerse en el nivel dimensional de la conducta sin saltos de nivel...

Estas consideraciones se fundamentan, a su vez, en la concepción inductivista y un tanto baconiana que tiene Skinner de la ciencia: ciencia concebida como conjunto de leyes inductivas a las que se llega por una observación tenaz de los hechos, con un máximo de paciencia y un mínimo de imaginación.

Dejemos aparte el hecho de que la filosofía de la ciencia actual levanta serias objeciones contra esta concepción inductivista (Hanson, Feyerabend, Popper y Lakatos). Lo que nos importa es la cauta astringencia que impone a la construcción del sistema psicológico. En efecto, las exaltaciones de la imaginación deben embridarse cuando se trata de construir un sistema que permita predecir y controlar las manifestaciones eferentes de los organismos (pues es éste, y no otro, el objetivo final de la psicología): el sistema debe ser fundamentalmen-

te descriptivo y "positivista", y definir los conceptos en función de observaciones inmediatas, sin darles propiedades locales o fisiológicas. Además, "el énfasis en la descripción positivista se refleja en un rechazo decidido de la teoría formal y del establecimiento explícito de postulados, axiomas o hipótesis" (VERPLANCK, *Modern Learning Theory).* Deben evitarse tanto las variables fisiológicas o físicas –pues la psicología debe mantenerse en su propio nivel de discurso–, como los conceptos originados en un sentido común herido de viejas cicatrices animistas y dualistas.

Dice Verplanck que el sistema "es, en cierto sentido, nihilista. Propone que se abandonen todos los modos tradicionales de pensar en psicología; sean fenomenológicos, mentalistas o fisiológicos". Ocurre que frente al "interiorismo" de esos modos tradicionales de pensar, la concepción "nihilista" de Skinner nos propone una consideración exteriorista del objeto de la psicología como si se tratase de una "caja negra".

Pero este nuevo cargo también nos exige oír la defensa del autor: "obviamente –nos dice– el organismo no está vacío y no se le puede tratar adecuadamente como una mera caja negra". Ante tales protestas de inocencia, ¿cómo podemos decir que Skinner considera al organismo como una caja negra? Lo decimos por definición. Porque, por definición, son teorías de caja negra aquellas que "se concentran en la conducta de los sistemas y particularmente en sus entradas y salidas observables" (BUNGE, *Teoría y Realidad*). Por lo tanto, decir de una teoría que es un "modelo de caja negra" no es acusarla de nada, sino simplemente definir la actitud del teórico cuando, por unas razones o por otras, prescinde de los estados internos del sistema que estudia y se limita a representar los pares de entrada y salida del sistema y establecer las relaciones funcionales que se dan entre dichos pares.

Las teorías de caja negra han sido de gran utilidad en la historia de la ciencia.

Estas teorías tienen muchas ventajas, como su generalidad, su carácter global, su precisión, sencillez y seguridad. Pueden existir, por tanto, poderosas razones *estratégicas* para prescindir de los estados internos del sistema y limitarse a las variables externas.

En la conversión reductiva de los postulados metodológicos en enunciados de causación reside la rueda central del engranaje de la construcción teórica de Skinner, la que permite dar el salto del análisis experimental del comportamiento al conductismo radical: en éste se niega la eficacia causal de variables intervinientes o constructos hipotéticos que se expulsaron de aquél por razones de método. En una palabra, la aseveración de que "el análisis experimental va directamente a las causas antecedentes del ambiente" se transforma en la suposición de que "el comportamiento de una persona está determinado por sus historias genética y ambiental y no por la persona misma como agente iniciador y creativo". Lo que comenzó siendo una defensa estratégica de la necesidad de un modelo de caja negra, termina por convertirse en un ambientalismo extremo.

Esta reducción se hace, además, en aras de un causalismo extremo que no está justificado ni por el modesto concepto de "relación funcional" de que parte Skinner, ni por los resultados que en función de probabilidad se obtienen en el laboratorio de análisis experimental del comportamiento. En efecto, uno de los aspectos centrales del pensamiento de Skinner –como en el de Freud– es la afirmación de la absoluta determinación del comportamiento humano: "es fácil creer –dice– que la voluntad es libre y que la persona es libre para escoger. El problema planteado es el determinismo. La generación espontánea del comportamiento ha llegado al mismo punto que la generación espontánea de los insectos y microorganismos en tiempos de Pasteur". Pero el verdadero problema no es el del determinismo, sino el hecho de que Skinner restringe el concepto de determinación al principio de causación.

Al admitir sólo una determinación lineal, unidireccional y externa del comportamiento, Skinner cierra toda posibilidad de explicar adecuadamente la especial relación adaptativa que mantiene el organismo con su entorno, pues esta relación exige acudir a conceptos como el de "retroacción", totalmente ajenos a los horizontes mentales del conductismo radical. Bien es verdad que, como señala el autor, el mentalismo dualista (y no todo mentalismo lo es), al desencarnar del mundo físico al supuesto "homúnculo" generador del comportamiento, ha oscurecido la influencia de los determinantes ambientales. Pero el conductismo radical limita también la indagación, incluso en el propio campo del condicionamiento operante: el descubrimiento de relaciones funcionales entre las contingencias ambientales y la conducta de los organismos no agota los recursos explicativos de la psicología, sino que plantea nuevas interrogantes que deberán ser contestadas en una exploración posterior (por ejemplo, ¿por qué aumenta la tasa de respuesta a medida que disminuye el intervalo de refuerzo?). La elegante regularidad de las leyes que nos brinda el análisis experimental del comportamiento sólo puede explicarse, a su vez, recurriendo a los factores internos. Los resultados diferenciales de los diversos programas de refuerzo parecen indicar que el organismo, en definitiva, organiza; que maximiza, en cierto modo, las consecuencias positivas de su acción sobre el medio. Y este fenómeno sólo encuentra su razón de ser en la noción de organización interna.

Del mismo modo que se elimina la alusión a la concepción orgánica y organizadora del objeto de la psicología, también se prescinde de la concepción de los grupos sociales como sistemas que poseen leyes con cierta autonomía. Con ello, se abre la posibilidad de una nueva reducción: la reducción "psicologista" de los fenómenos sociales a la conducta individual.

El resultado de esta doble reducción ambientalista y psicologista, que somete al individuo a las inexorables leyes del Ambiente Absoluto, es que en la cima del conductismo radical ondea una contradicción insalvable: la de que "en esta formulación el juego dialéctico del hombre en el mundo resulta imposible por principio" (JOSE LUIS PINILLOS, *¿Más allá del hombre libre?).*

Si en la cima del conductismo radical ondea una contradicción, en la base navega la imprecisión: aquellos conceptos, a cuya precisión positiva se sacrificaron tantas cosas en el análisis experimental del comportamiento, pierden su concreción en el conductismo radical.

(III). El contenido de verdad de una teoría puede ser relativamente independiente de lo adecuado del procedimiento con que se construye, pues las razones falsas y los procedimientos de construcción espúreos pueden conjugarse con los enunciados verdaderos.

De forma similar, los "saltos reductivos" descritos en el apartado anterior no implican necesariamente la falsedad de las propuestas fundamentales del conductismo radical, por lo que se hace necesario contrastarlas directamente.

Señalábamos en (I) que una de las razones fundamentales que permiten la traducción comportamental directa de los términos mentales es el carácter no causal de sus referentes; "la posición –dice Skinner– puede establecerse de esta manera: lo que se siente o se observa introspectivamente no es un mundo de naturaleza no física de la conciencia, la mente o la vida mental, sino el propio cuerpo del observador. Esto no quiere decir... que la introspección sea una cla-

se de investigación psicológica ni tampoco (y aquí está el núcleo del argumento) que lo que se sienta o se observe introspectivamente sea la causa del comportamiento". Este "núcleo del argumento" flota por toda la obra. Así, se nos dice que "la susceptibilidad de refuerzo se debe a su valor de supervivencia y no a ningún sentimiento asociado", que "los sentimientos, simplemente, son productos colaterales de las condiciones responsables del comportamiento", etcétera.

Estas afirmaciones nucleares del conductismo radical son extraordinariamente generales y de difícil comprobación. Pero, en todo caso, parece que para refutarlas habría que demostrar que los estados corporales, que se identifican con los sentimientos, *sí* son la causa del comportamiento y que su valor causal se debe, no a su valor de supervivencia, sino precisamente a los sentimientos asociados a ellos.

Pues bien, todo esto viene haciéndose desde hace veinte años. En 1954 Old y Milner observaron que a algunos de los animales de su laboratorio parecía "gustarles" la estimulación eléctrica de ciertas zonas del cerebro y que aprendían a emitir una respuesta operante con el fin de lograr tal estimulación. Más o menos en los mismos años, Neal Miller y sus colaboradores descubrían que la estimulación de determinados puntos del hipotálamo desempeñaba el papel de refuerzo "aversivo" en una situación de condicionamiento operante. Desde entonces, el fenómeno se ha estudiado en detalle, corroborándose plenamente: cuando el electrodo se sitúa en las "áreas de placer" del sistema límbico, los animales responden regularmente, durante largos períodos de tiempo, y la eficacia de tal estimulación es mayor que la de cualquier reforzador natural (llegándose a obtener tasas de hasta 5000 operantes por hora), si bien el efecto del programa de refuerzo es aproximadamente el mismo. Además, los estudios con pacientes psiquiátricos indican que éstos identifican la estimulación límbica con sentimientos intensos de placer, y llegan a desarrollar tasas de 1100 operantes por hora para lograrla.

En una divulgación de este tipo de experiencias, publicada recientemente en castellano, Campbell *(Las áreas del placer)* señala que "en el caso de la autoestimulación intracraneal tanto las personas como las formas inferiores se comportan de un modo compulsivo y exclusivo. No desean hacer otra cosa que el mínimo esfuerzo necesario para conseguir la estimulación de su sistema límbico, accionando repetidamente la palanca sin pensar para nada en el alimento, ni en la bebida, ni en ninguna otra de las necesidades de la vida". De hecho, los animales ponen literalmente en peligro la supervivencia con tal de lograr el estado corporal identificable con el sentimiento de placer intenso y morirían –aunque sólo fuese de inanición– de no impedirlo el experimentador. Parece, por tanto, que la afirmación de que "la susceptibilidad de refuerzo se debe a su valor de supervivencia y no a ningún sentimiento asociado" no se tiene en pie y que tendríamos que convertirla en su contraria ("... se debe a algún sentimiento asociado y no a su valor de supervivencia"), para acercarnos algo a la realidad de los datos.

Pero, según Skinner, existirían aún otras razones importantes para prescindir de los estados internos: en primer lugar, las dificultades metodológicas debidas al carácter privado de los referentes de la introspección; luego, el hecho de que "la comunidad verbal debe tratar con sistemas nerviosos bastante primitivos". Ambas razones se integran en un argumento común, cuyo desarrollo viene a ser el siguiente: (a) el autoconocimiento tiene un origen social, "surgió como producto de las contingencias sociales impuestas por la comunidad verbal"; (b) pero presenta graves limitaciones, pues mientras "la comunidad puede enseñar al niño a nombrar los colores de diversas maneras... no puede seguir la misma práctica al enseñarle a describir los estados de su propio cuerpo porque carece de la información que necesita para elogiarlo o corregirlo"; (c) por lo demás, "lo que se siente o se observa introspectivamente no es una parte importante de la fisiología que llene la laguna temporal de un análisis histórico"; (d) ello se debe a que "las contingencias sociales dispuestas por la comunidad verbal no han actuado durante suficiente tiempo para permitir la evolución de un sistema nervioso apropiado".

Aun admitiendo el ingenio (y hasta la corrección) de la argumentación de Skinner, toda ella se basa en la muy discutible suposición de que las dificultades metodológicas que lastran la autoobservación son razón suficiente para prescindir de los estados internos.

Del mismo modo que los instrumentos astronómicos permiten ampliar el radio de acción del ojo, también es posible diseñar artefactos que amplíen el área de observación, por parte del sujeto, de sus propios estados corporales. El método de *biofeedback* se basa en ellos: cuando al sujeto se le proporcionan los medios necesarios para conocer sus respuestas vegetativas es capaz de condicionarlas. Jacobson, por ejemplo, ha sometido a condicionamiento operante las respuestas miográficas de sus sujetos, logrando la emisión de operantes musculares. Así se ha condicionado, también, la actividad eléctrica del S.N.C., el ritmo cardíaco, la tensión arterial, etcétera.

Y en lo que se refiere al segundo procedimiento, las alteraciones comportamentales pueden obligar a recurrir a los términos psicológicos como postulados teóricos. El intento de impedir el desarrollo de tales postulados es extraordinariamente restrictivo y difícil, y no existe nada en la naturaleza de la metodología científica que nos obligue a ello: tenemos que recordar aquí que el propio Skinner ha atribuido, alguna vez, las "alteraciones" en la curva de extinción operante de sus animales de laboratorio a perturbaciones emocionales (es decir: a entidades teóricas).

Pero supongamos que lo inadecuado de los procedimientos de construcción, el carácter reductivo del sistema, su oposición a ciertos hechos firmemente establecidos, etcétera, sean menudencias y que, realmente, merezca la pena lograr la pretensión fundamental del conductismo radical: eliminar las adscripciones mentales y los términos psicológicos, sustituyéndolos por un lenguaje dotado de un vocabulario limitado exclusivamente a la descripción de los fenómenos externos ambientales y comportamentales. Sellars *(Empiricism and the philosophy of Mind)* ha ideado un precioso mito que comienza, precisamente, así: "Imaginemos un estadio de la prehistoria en que los humanos estuvieran limitados a lo que yo llamaré un lenguaje ryleano (nosotros le llamaremos 'skinneriano', pues las diferencias entre Ryle y Skinner son despreciables al respecto), un lenguaje cuyo vocabulario descriptivo fundamental hablase de propiedades públicas, de objetos públicos localizados en el espacio y con duración temporal"... claro que no sería fácil de lograr un tipo de prehomínidos con un lenguaje tan limitado (el propio Skinner reconoce las dificultades de hablar el idioma del conductismo), pero la cosa no sería imposible: podrían utilizarse, para conseguirlo, las poderosas técnicas del condicionamiento operante.

La cuestión que se nos plantea, entonces, es la siguiente (Sellars): "¿qué recursos habría que añadir al lenguaje ryleano de esos animales hablantes para que llegaran a reconocerse unos a otros como animales que *piensan, observan* y tienen *sentimientos* y *sensaciones,* tal como nosotros empleamos estos términos?" (Po-

dríamos reformular la pregunta de este modo: "¿qué recursos habría que añadir a este lenguaje para que sus poseedores dejaran de ser conductistas radicales?"). Sellars ha demostrado que bastaría, en primer lugar, con permitir que los prehomínidos ryleanos pudieran caracterizar sus respectivas conductas verbales en términos semánticos (decir que "tal cosa" significa "tal otra") pues, en tal caso, su lenguaje poseería una de las propiedades fundamentales con que vienen caracterizándose los fenómenos psíquicos desde Franz Brentano: su carácter intencional, su referencia a algo que no son ellos. Ahora bien, "es evidente que el habla semántica acerca del significado o referencia de las expresiones verbales tiene la misma estructura que el discurso mentalista acerca de la estructura de los pensamientos".

Pensemos, ahora, que –a pesar de sus limitaciones– esos "futuros habitantes" de Walden Dos fueran capaces de teorizar, de construir modelos de la realidad; sin duda, explicarían el origen de sus expresiones verbales externas atribuyéndolo a un "habla interna" o "pensamiento" que poseería, a su vez, la propiedad de ser intencional. En otras palabras: para lograr la pretensión fundamental del conductismo radical no bastaría con limitar el lenguaje a un vocabulario "ryleano-skinneriano", sino que sería preciso eliminar el problema de la significación y la posibilidad de formular teorías.

Por eso hablábamos al principio de este comentario de la interdependencia existente entre las prescripciones metodológicas del conductismo radical (cuyo aspecto más relevante es el antiteoricismo) y su postulado epistemológico fundamental (traducir al vocabulario comportamental los términos mentales): en realidad, son dos caras de una misma realidad.

Para el historiador de la psicología, el conductismo radical representa, hoy, un papel muy similar al del estructuralismo de Titchener en la psicología norteamericana de principios de siglo: es un intento inaceptable e inútil de impedir que se abran las ventanas a las nuevas corrientes de pensamiento –como la psicología cognitiva– en virtud de un purismo metodológico basado en una concepción muy restrictiva y discutible de lo que es la ciencia.

Skinner ha pedido, con frecuencia, que se establezcan unos límites claros entre su análisis experimental de la conducta y su conductismo radical como filosofía: acceder a su petición es el mejor homenaje que podemos y debemos hacerle al gran psicólogo norteamericano.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LOS DISTINTOS TIPOS DE FOTOSINTESIS Y SU REGULACION

LA BASE MOLECULAR DE LA VIDA. *Selecciones de Scientific American*. Editorial Blume, 1971.

METALLOENZYMES OF THE NITRATE-REDUCING SYSTEM. M. Losada en *J. Molec. Catal. 1*, 245 (1976).

POTENCIOMETRIA Y BIOENERGETICA. A. M.ª Relimpio, J. M.ª Vega, M. G. Guerrero y M. Losada, Publicaciones de la Universidad de Sevilla, en prensa.

PODER REDUCTOR Y LA REGULACION DE LA FOTOSÍNTESIS. M. Losada en *Avances de la Bioquímica en España*. Fundación Juan March, en prensa.

MISILES CRUCERO

THE CRUISE MISSILE AND ARMS CONTROL. Richard Burt en *Survical*, vol. 18, n.º 1, págs. 10-17; enero-febrero, 1976.

EFFECTIVE MILITARY TECHNOLOGY FOR THE 1980s. Richard L. Garwin en *International Security*, vol. 1, n.º 2, págs. 50-77; otoño, 1976.

THE CRUISE MISSILE: THE END OF ARMS CONTROL? Alexander R. Vershbow en *Foreign Affairs*, vol. 54, n.º 4, págs. 133-146; octubre, 1976.

FOBOS Y DEIMOS

MARINER 9 TELEVISION OBSERVATIONS OF PHOBOS AND DEIMOS, 2. J. B. Pollack, J. Veverka, M. Noland, C. Sagan. T. C. Duxbury, C. H. Acton Jr., G. H. Born, W. K. Hartmann y B. A. Smith en *Journal of Geophysical Research*, vol. 78, n.º 20, págs. 4313-4326; julio 10, 1973.

A MARINER 9 ATLAS OF THE MOONS OF MARS. Joseph Veverka, Michael Noland, Carl Sagan, James Pollack, Lynn Quam, Robert Tucker, Botand Eross, Thomas Duxbury y William Green en *Icarus*, vol. 23, n.º 2, págs. 206-289; octubre, 1974.

PHOBOS: CONTROL NETWORK ANALYSIS. Thomas C. Duxbury en *Icarus*, vol. 23, n.º 2, págs. 290-299; octubre, 1974.

COMUNICACIONES INTERCONTINENTALES POR SATELITE

THE BEGINNINGS OF SATELLITE COMMUNICATIONS. J. R. Pierce. San Francisco Press, Inc., 1968.

SATELLITE COMMUNICATIONS ENGINEERING. K. Miya. Lattice Company, Tokio, 1975.

COMMUNICATION SATELLITE DEVELOPMENTS. Dirigido por G. E. La Vean y W. G. Schmidt en *Progress in Astronautics and Aeronautics: vols. 41 y 42*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1976.

SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS. Dirigido por I. Kadar en *AIAA Selected Reprint Series: Vol. XVIII*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1976.

EL ORIGEN DE LA ATEROSCLEROSIS

EVIDENCE FOR A MONOCLONAL ORIGIN OF HUMAN ATHEROSCLEROTIC PLAQUES. Earl P. Benditt y John M. Benditt en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 70, n.º 6, págs. 1753-1756; junio, 1973.

THE CORONARY DRUG PROJECT: FINDINGS LEADING TO DISCONTINUATION OF THE 2.5-MG/DAY ESTROGEN GROUP. The Coronary Drug Project Research Group en *The Journal of the American Medical Association*, vol. 226, n.º 6, págs. 652-657; noviembre 5, 1973.

IMPLICATIONS OF THE MONOCLONAL CHARACTER OF HUMAN ATHEROSCLEROTIC PLAQUES. E. P. Benditt en *Beiträge zur Pathologie*, vol. 158, n.º 4, págs. 405-416; septiembre, 1976.

LA SEPARACION DE ISOTOPOS CON LASER

ISOTOPE SEPARATION PROCESSES. William Spindel en *American Chemical Society Symposium Series: No. 11*. American Chemical Society, 1975.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF LASER ISOTOPE SEPARATION. Jack P. Aldridge III, John H. Birely, Cyrus D. Cantrell III y David C. Cartwright en *Physics of Quantum Electronics: vol. 4*. Dirigido por Stephen F. Jacobs, Murray Sargent III, Marlan O. Scully y Charles T. Walker. Addison-Wesley Publishing Company, 1976.

LASER ISOTOPE SEPARATION. V. S. Letokhov y C. B. Moore en *Soviet Journal of Quantum Electronics*, en prensa.

LENGUAJE SOCIAL Y NO SOCIAL

MOTHERS' SPEECH TO CHILDREN LEARNING LANGUAGE. Catherine E. Snow en *Child Development*, vol. 43, n.º 2, págs. 549-565; junio, 1972.

THE DEVELOPMENT OF COMMUNICATION SKILLS: MODIFICATIONS IN THE SPEECH OF YOUNG CHILDREN AS A FUNCTION OF LISTENER. Marilyn Shatz y Rochel Gelman en *Monographs of the Society for Research in Child Development*, vol. 38, n.º 5; 1973.

THE DEVELOPMENT OF ROLE-TAKING AND COMMUNICATION SKILLS IN CHILDREN. John H. Flavel en colaboración con Patricia T. Botkin, Charles L. Fry, Jr., John W. Wright y Paul E. Jarvis. Robert E. Krieger Publishing Company, 1975.

LA RESPUESTA A LA ACETILCOLINA

THE SYNAPSE en *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, vol. 15; 1976.

SINGLE-CHANNEL CURRENTS RECORDED FROM MEMBRANE OF DENERVATED FROG MUSCLE FIBRES. Erwin Neher y Bert Sakmann en *Nature*, vol. 260, n.º 5554, págs. 799-802; abril 29, 1976.

RATES AND EQUILIBRIA AT THE ACETYLCHOLINE RECEPTOR OF *ELECTROPHORUS* ELECTROPLAQUES. Robert E. Sheridian y Henry A. Lester en *Journal of General Physiology*, en prensa.

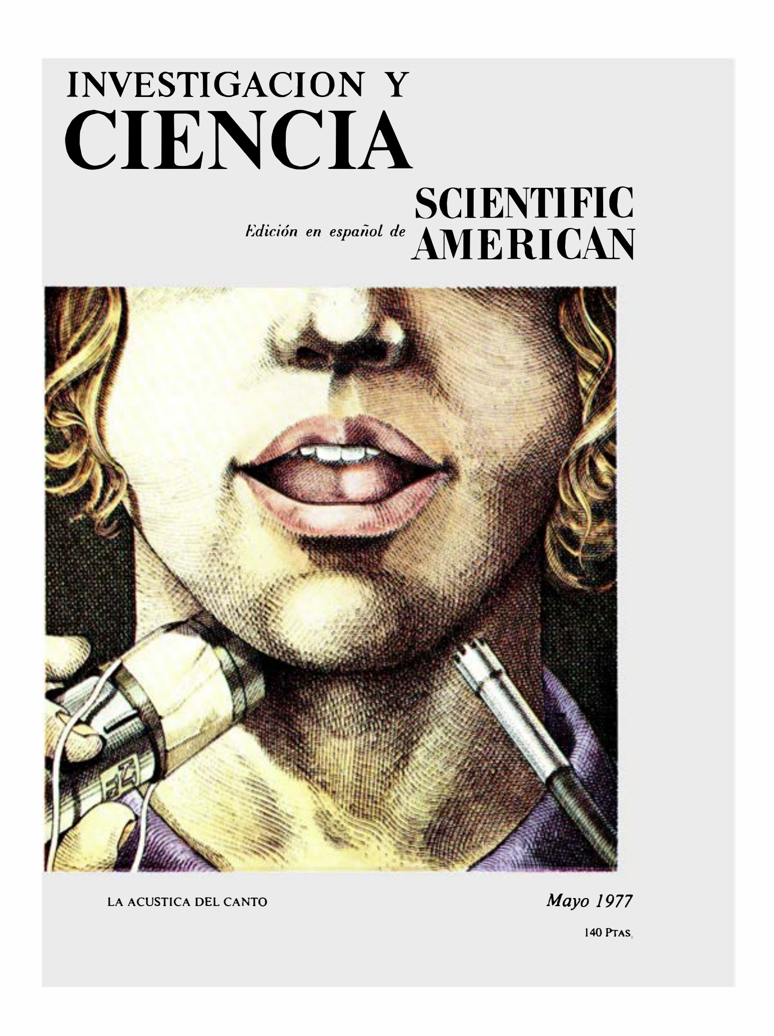
JUEGOS MATEMATICOS

THE FOUR-COLOR PROBLEM, 1840-1890. H. S. M. Coxeter en *The Mathematics Teacher*, vol. 52, n.º 4, págs. 283-289; abril, 1959.

THE FOUR-COLOR MAP THEOREM IN *MARTIN GARDNER'S NEW MATHEMATICAL DIVERSIONS FROM SCIENTIFIC AMERICAN*. Martin Gadner, Simon and Schuster, 1966.

THRTEEN COLORFUL VARIATIONS ON GUTHRIE'S FOUR-COLOR CONJECTURE. Thomas L. Saaty en *The American Mathematics Monthly*, vol. 79, n.º 1, págs. 2-43; enero, 1972.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



SUPERFENIX: REACTOR NODRIZA A PLENA ESCALA, Georges A. Vendryes

En Francia se ha decidido iniciar la construcción de una central de reactor nodriza de 1200 megavatios. Este proyecto europeo conjunto será el prototipo de las futuras centrales nucleares.

ONDAS EN EL VIENTO SOLAR, J. T. Gosling y A. J. Hundhausen

El viento solar es la atmósfera exterior del sol que se expande en el espacio. Las variaciones en su velocidad de propagación se interpretan como ondas cuya amplitud aumenta con la distancia, en forma análoga a como las olas oceánicas se amplifican y rompen al acercarse a la playa.

LOS RECEPTORES DE LOS OPIACEOS Y SUBSTANCIAS OPIACEAS ENDOGENAS, Solomon H. Snyder

La morfina y sus derivados producen sus efectos debido a su unión con unos lados receptores específicos situados en la membrana de células cerebrales y espinales. Las substancias similares a la morfina que se hallan en el organismo posiblemente actúan también en dichos lados de unión.

FIJACION BIOLOGICA DEL NITROGENO, Winston J. Brill

Solamente ciertas bacterias y algas inferiores poseen el "equipo" celular necesario para convertir el nitrógeno atmósferico en amoniaco. Se trata de los principales suministradores de este nutriente agrícola limitado.

LA ACUSTICA DEL CANTO, Johan Sundberg

El órgano de la voz es un instrumento que consta de una fuente de energía (pulmones), un oscilador (cuerdas vocales) y una caja de resonancia (laringe, faringe y boca).

LAS ROCAS ANTIGUAS Y EL DESARROLLO DE LOS CONTINENTES, Stephen Moorbath

¿Surgió la corteza continental durante los tiempos de formación de la tierra, o se debió a fenómenos de acreción posteriores merced a determinados procesos tectónicos?

LOS PRIMEROS MAYAS, Norman Hammond

Las excavaciones arqueológicas en Bélize, América Central, han retrotraído los orígenes de los mayas hasta el 2500 a. C.

PECES LUMINOSOS DESTELLANTES, John E. Mc Cosker

Estas especies marinas iluminan el agua por medio de un gran órgano situado debajo de cada ojo, que alberga bacterias luminosas vivas. Utilizan la luz para ver, comunicarse, atraer a las presas y confundir a sus depredadores.

